

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده علوم زمین

پایان نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی

عنوان پایان نامه:

بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیائی

چشمه کارستی ورسخواران، فیروزکوه

دانشجو:

حسین ابراهیمی

استاد راهنما:

دکتر غلامحسین کرمی

تیر ماه ۱۳۹۶

شماره: ۱۲۷۶۵
تاریخ: ۹۶/۴/۱۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین ابراهیمی با شماره دانشجویی ۹۳۰۱۶۹۴ رشته زمین شناسی گرایش آشناسی تحت عنوان بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران، فیروزکوه که در تاریخ ۹۶/۴/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز) درجه مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

| امضاء | مرتبه علمی | نام و نام خانوادگی | عضو هیات داوران |
|-------|------------|------------------------------|---------------------------|
| | دانشیار | آقای دکتر غلامحسین کرمی | ۱- استاد راهنمای اول |
| | - | - | ۲- استاد راهنمای دوم |
| | - | - | ۳- استاد مشاور |
| | استادیار | خانم دکتر گیتی فرقانی تهرانی | ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی |
| | استادیار | آقای دکتر رحیم باقری | ۵- استاد ممتحن اول |
| | استادیار | آقای دکتر هادی جعفری | ۶- استاد ممتحن دوم |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر پرویز لعلی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۶/۴/۱۲

توضیح: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را که به من توفیق انجام این تحقیق را عطا فرمود و من بر خود واجب میدانم از زحمات و همکاری کلیه کسانی که در مراحل تهیه این پروژه اینجانب را یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم. از استاد راهنما جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی، که مرا همواره با راهنمایی‌های ارزشمند خویش یاری رساندند سپاسگزاری می‌کنم، و از خداوند متعال برای ایشان آرزوی توفیق روزافزون و سلامتی بی‌پایان می‌نمایم.

از آقای مهندس عبدالله شمسی نیز، به خاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان سپاسگزارم، و برای ایشان صمیمانه آرزوی موفقیت روزافزون در تمام مراحل زندگی دارم. از تمام دوستان و همکلاسی‌های عزیزم از جمله آقایان اکبری، موسوی، ترابی و کاظمی که در دوره کارشناسی ارشد افتخار آشنایی با ایشان را داشتم و مرا یاری نموده‌اند، سپاسگزارم. در پایان از خانواده که همواره مشوق و راهنمای من در تمام مراحل زندگی، و مؤثر در شوق ادامه تحصیل این‌جانب بوده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

حسین ابراهیمی

تیر ماه ۱۳۹۶

اینجانب حسین ابراهیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیائی چشمه کارستی ورسخواران، فیروزکوه 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 اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

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.

چکیده

چشمه کارستی ورسخواران با میانگین آبدهی حدود ۱/۴ مترمکعب بر ثانیه یکی از مهم‌ترین چشمه‌های شهرستان فیروزکوه می‌باشد که در جنوب غربی این شهرستان در روستای ورسخواران واقع شده است. این چشمه در بخش شرقی یال ناودیس قره‌داغ قرار گرفته و به علت عملکرد یکی از شاخه‌های فرعی گسل مشا- فشم که این ناودیس را قطع کرده ظهور پیدا کرده است. آبخوان چشمه را واحدهای سنگی مربوط به دوران مزوزوئیک تا سنوزوئیک تشکیل می‌دهند. به منظور ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب چشمه طی ۱۸ ماه اندازه‌گیری شده است. بررسی‌ها نشان داد که ضریب تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه نسبتاً اندک می‌باشد. علاوه بر این منحنی فرود چشمه دارای یک شیب بوده و مقدار ضریب بده آن حدود ۰/۰۰۳ می‌باشد. اندک بودن ضریب تغییرات آبدهی، هدایت الکتریکی و یونهای اصلی و همچنین تک شیب بودن منحنی فرود چشمه عمدتاً به دلیل شکل کشیده آبخوان و وجود طولانی مدت برف در حوضه آبرگیر چشمه می‌باشد. وجود تعدادی فروچاله و گودی مسدود در حوضه آبرگیر چشمه بیانگر این است که سیستم غالب جریان در چشمه افشان نمی‌باشد. با توجه به آبدهی نسبتاً بالای چشمه و وجود فروچاله و گودی‌های مسدود در حوضه آبرگیر چشمه و همچنین ضریب تغییرات اندک پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه، می‌توان این چنین اظهارنظر نمود که سیستم غالب جریان در آبخوان تغذیه کننده چشمه ورسخواران از نوع مجرای-افشان می‌باشد. همچنین در این تحقیق، حوضه آبرگیر چشمه به صورت مقدماتی ترسیم گردید. براساس محدوده مشخص شده، مساحت حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران حدود ۴۷ کیلومترمربع برآورد شد. برای محدوده حوضه آبرگیر مشخص شده، مقدار میانگین بارش سالیانه از روش نمودار ارتفاع - بارش ایستگاههای مجاور برابر با ۷۲۲ میلی‌متر تعیین گردید. همچنین با توجه به بازدیدهای صحرائی و ارزیابی درصد پوشش خاک، توسعه فضاهای انحلالی و سایر عوارض مورفولوژیکی کارست، درصد تغذیه سالیانه در محدوده مورد نظر برابر با ۵۵ درصد برآورد شد. با داشتن مقادیر بارش، درصد تغذیه سالیانه، حجم تغذیه سالیانه حوضه آبرگیر مقدماتی برابر با ۱۸/۸ میلیون مترمکعب محاسبه گردید. علاوه بر این حجم تخلیه سالیانه چشمه از طریق هیدروگراف سالیانه چشمه برابر با ۲۰/۷ میلیون مترمکعب محاسبه شد. با توجه به عدم پیچیدگی زمین‌شناسی و همچنین خطای نسبی ناچیز (۱۰ درصد) بین مقادیر تغذیه و تخلیه سالیانه می‌توان این چنین نتیجه گرفت که حوضه آبرگیر مقدماتی ترسیم شده، از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

کلمات کلیدی: هیدروژئولوژیکی، هیدروژئوشیمیایی، حوضه آبرگیر، چشمه کارستی ورسخواران، تغذیه

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

تعیین حوضه آبخیز چشمه کارستی ورسخواران، فیروزکوه، سی و پنجمین گردهمایی علوم زمین،

سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران. اسفند ۱۳۹۵

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق..... ۲
- ۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه..... ۳
- ۳-۱- آب و هوای منطقه مورد مطالعه..... ۴
- ۱-۳-۱- نمودار امپروترومیک..... ۶
- ۲-۳-۱- ضریب اقلیمی دمارتن..... ۶
- ۴-۱- زمین‌شناسی منطقه..... ۸
- ۱-۴-۱- چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی..... ۸
- ۱-۴-۱-۱- واحدهای ژوراسیک..... ۹
- ۱-۴-۱-۲- واحدهای کرتاسه فوقانی..... ۱۳
- ۱-۴-۱-۳- واحدهای ترشیاری..... ۱۴
- ۱-۴-۱-۴- رسوبات آبرفتی کواترنری..... ۱۵
- ۵-۱- زمین‌شناسی ساختمانی محدوده مورد مطالعه..... ۱۵
- ۱-۵-۱- چین خوردگی‌ها..... ۱۶
- ۱-۵-۲- گسل‌ها..... ۱۶
- ۶-۱- ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه..... ۱۸
- ۷-۱- هیدرولوژی منطقه..... ۱۹
- ۸-۱- هیدروژئولوژی منطقه..... ۲۰

فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

- ۱-۲- تعریف و اهمیت کارست..... ۲۳
- ۲-۲- طبقه‌بندی مناطق کارستی..... ۲۴
- ۳-۲- ژئومورفولوژی نواحی کارستی..... ۲۵
- ۱-۳-۲- چشمه‌های کارستی..... ۲۶
- ۴-۲- جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی..... ۲۸
- ۱-۴-۲- سیستم جریان در آبخوان‌های کارستی..... ۲۸
- ۵-۲- ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی..... ۲۹
- ۶-۲- ارزیابی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی..... ۳۴
- ۷-۲- تغذیه در کارست..... ۳۶
- ۱-۷-۲- تعیین حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی..... ۳۸
- ۱-۷-۲-۱- روش بیلان هیدرولوژیکی..... ۳۹
- ۲-۷-۲-۱- روش‌های مدل‌سازی، سنجش از دور و ترکیبی..... ۴۰
- ۸-۲- مطالعات انجام شده در ارتباط با چشمه‌های کارستی در ایران..... ۴۲

فصل سوم: مواد و روش‌ها

- ۳-۱- جمع‌آوری اطلاعات و مروری بر مطالعات پیشین ۴۴
- ۳-۲- بازدیدهای صحرایی و زمین‌شناسی از حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران ۴۵
- ۳-۳- نمونه‌برداری ماهیانه از چشمه ورسخواران ۴۵
- ۳-۳-۱- نمونه‌برداری از منابع آب ۴۶
- ۳-۳-۲- نمونه‌برداری هیدروشیمیایی از منابع آب ۴۶
- ۳-۳-۳- اندازه‌گیری دبی ۴۷
- ۳-۳-۴- اندازه‌گیری درجه حرارت ۴۷
- ۳-۳-۵- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ۴۷
- ۳-۳-۶- اندازه‌گیری pH ۴۸
- ۳-۴- اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ۴۸
- ۳-۴-۱- اندازه‌گیری آنیون‌ها ۴۸
- ۳-۴-۲- اندازه‌گیری کاتیون‌ها ۴۹
- ۳-۴-۳- محاسبه درصد خطای آزمایش ۴۹
- ۳-۴-۴- سختی کل (Total Hardness) ۴۹
- ۳-۴-۵- کل مواد محلول ۵۰
- ۳-۴-۶- محاسبه ضرایب اشباع (کلسیت، دولومیت، هالیت) ۵۰
- ۳-۵- محاسبات ضرایب آماری ۵۰
- ۳-۶- تعیین محدوده حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران ۵۱

فصل چهارم: بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی

ورسخواران

- ۴-۱- ارزیابی ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران ۵۴
- ۴-۱-۱- کارن‌ها ۵۵
- ۴-۱-۲- دره‌های خشک ۵۷
- ۴-۱-۳- گودی مسدود ۵۷
- ۴-۱-۴- فروچاله‌ها ۵۸
- ۴-۱-۵- آبی کارست در منطقه ۵۹
- ۴-۱-۶- حفرات انحلالی ۶۰
- ۴-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه ورسخواران ۶۱
- ۴-۲-۱- تغییرات زمانی آبدی چشمه کارستی ورسخواران ۶۳
- ۴-۲-۲- ارزیابی و تحلیل ضریب و منحنی فرود چشمه کارستی ورسخواران ۶۴
- ۴-۲-۳- تغییرات زمانی درجه حرارت در چشمه کارستی ورسخواران ۶۶
- ۴-۳- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران ۶۸
- ۴-۳-۱- تغییرات زمانی هدایت الکتریکی در چشمه کارستی ورسخواران ۶۸

- ۲-۳-۴- تغییرات زمانی غلظت یونهای اصلی (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) در چشمه کارستی ورسخواران..... ۷۰
- ۳-۳-۴- ضریب همبستگی بین هدایت الکتریکی و غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها..... ۷۲
- ۴-۳-۴- پارامترهای کیفی محاسبه شده چشمه کارستی ورسخواران..... ۷۴
- ۵-۳-۴- بررسی فرایندهی ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان چشمه کارستی ورسخواران..... ۷۵
- ۶-۳-۴- سختی کل..... ۷۶
- ۷-۳-۴- نسبت کلسیم به منیزیم..... ۷۷
- ۸-۳-۴- ارزیابی آب چشمه ورسخواران از طریق نمودارهای هیدروشیمیایی..... ۷۸
- ۴-۴- تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی ورسخواران..... ۸۱
- ۱-۴-۴- ترسیم حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه کارستی ورسخواران..... ۸۱
- ۲-۴-۴- برآورد میانگین بارش در محدوده تعیین شده..... ۸۳
- ۳-۴-۴- ارزیابی ارتفاع متوسط در حوضه آبرگیر چشمه..... ۸۴
- ۴-۴-۴- تعیین درصد تغذیه سالیانه در محدوده حوضه آبرگیر مقدماتی..... ۸۶
- ۵-۴-۴- محاسبه حجم تغذیه سالیانه برای حوضه آبرگیر مقدماتی..... ۸۷
- ۶-۴-۴- محاسبه حجم تخلیه سالیانه چشمه ورسخواران..... ۸۷
- ۷-۴-۴- ارزیابی صحت تعیین حوضه آبرگیر مقدماتی..... ۸۷

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

- ۱-۵- نتیجه گیری..... ۹۰
- ۲-۵- پیشنهادها..... ۹۲

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه..... ۳
- شکل ۱-۲- نمودار امپروترمیک منطقه مورد مطالعه..... ۷
- شکل ۱-۳- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه ۱۱
- شکل ۱-۴- موقعیت گسل ورسخواران و نمایی از آهک کرتاسه فوقانی در محل چشمه کارستی ورسخواران ۱۸
- شکل ۴-۱- نمایی از کارنهای پیچ و خم دار و شیاری در سنگ‌های کارستی حوضه آبگیر چشمه ورسخواران ۵۶
- شکل ۴-۲- نمایی از کارن‌های عمیق در حوضه آبگیر چشمه کارستی ورسخواران..... ۵۶
- شکل ۴-۳- نمایی از یک دره خشک کارستی در جنوب حوضه آبگیر چشمه ورسخواران..... ۵۸
- شکل ۴-۴- فروچاله‌های مشخص شده در ارتفاعات قره‌داغ..... ۵۹
- شکل ۴-۵- نمایی از اپی کارست کم ضخامت در لایه‌های آهکی ارتفاعات قره‌داغ..... ۶۰
- شکل ۴-۶- نمایی از فضا‌های انحلالی در لایه‌های آهکی نزدیک مظهر چشمه کارستی ورسخواران..... ۶۱
- شکل ۴-۷- نمایی از چشمه کارستی ورسخواران..... ۶۲
- شکل ۴-۸- هیدروگراف چشمه کارستی ورسخواران برای سال آبی ۹۵-۹۴..... ۶۳
- شکل ۴-۹- منحنی فرود چشمه کارستی ورسخواران در سال آبی ۹۴..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰- تغییرات زمانی درجه حرارت آب و دبی چشمه کارستی ورسخواران از خردادماه ۱۳۹۴ تا آذرماه ۱۳۹۵..... ۶۷
- شکل ۴-۱۱- تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و دبی چشمه کارستی ورسخواران در سال آبی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵ ۷۰
- شکل ۴-۱۲- تغییرات زمانی غلظت کاتیون‌های نمونه چشمه کارستی ورسخواران از مهر ۱۳۹۴ تا خرداد ۱۳۹۵ ۷۲
- شکل ۴-۱۳- تغییرات زمانی غلظت آنیون‌های نمونه چشمه کارستی ورسخواران از مهر ۱۳۹۴ تا خرداد ۱۳۹۵ ۷۲
- شکل ۴-۱۴- روند تغییرات یون بی‌کربنات و کلسیم آب چشمه ورسخواران در برابر تغییرات هدایت الکتریکی در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴..... ۷۳
- شکل ۴-۱۵- روند تغییرات یون سولفات و سدیم آب چشمه ورسخواران در برابر تغییرات هدایت الکتریکی در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴..... ۷۴
- شکل ۴-۱۶- روند تغییرات یون منیزیم کلر آب چشمه ورسخواران در برابر تغییرات هدایت الکتریکی در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴..... ۷۴
- شکل ۴-۱۷- دیاگرام پایپر مربوط به نمونه‌های چشمه کارستی ورسخواران..... ۷۹

- شکل ۱۸-۴- نمودار استیف چشمه کارستی ورسخواران نمونه مهر ماه ۱۳۹۴..... ۸۰
- شکل ۴-۱۹- نمودار شولر نمونه‌های چشمه کارستی ورسخواران..... ۸۰
- شکل ۴-۲۰- نقشه حوضه آبرگیر هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی ورسخواران..... ۸۲
- شکل ۴-۲۱- محدوده حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه کارستی ورسخواران در نرم افزار GOOGLE EARTH..... ۸۳
- شکل ۴-۲۲- رابطه بین ارتفاع بارندگی در ایستگاه‌های پلور و نجفدر..... ۸۴
- شکل ۴-۲۳- نمودار هیپسومتری حوضه آبرگیر چشمه کارستی ورسخواران..... ۸۵

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در اطراف محدوده مورد مطالعه..... ۴
- جدول ۱-۲- داده‌های درجه حرارت ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳..... ۴
- جدول ۱-۳- میانگین بارش در ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی اطراف محدوده مورد مطالعه از سال آبی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳..... ۵
- جدول ۱-۴- طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن (علیزاده ۱۳۸۹)..... ۸
- جدول ۲-۱- محدوده تغییرات جریان در محیط‌های کارستی..... ۲۹
- جدول ۴-۱- پارامترهای اندازه‌گیری شده در مظهر چشمه کارستی ورسخواران (از خرداد ۱۳۹۴ تا آذرماه ۱۳۹۵)..... ۶۲
- جدول ۴-۲- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی ورسخواران (بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر)..... ۷۱
- جدول ۴-۳- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های مربوط به چشمه ورسخواران از مهرماه ۱۳۹۴..... ۷۵
- جدول ۴-۴- طبقه بندی آب بر اساس سختی کل..... ۷۷
- جدول ۴-۵- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در اطراف حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران..... ۸۴
- جدول ۴-۶- جدول داده‌های هیپسومتری ارتفاعات قره‌داغ..... ۸۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

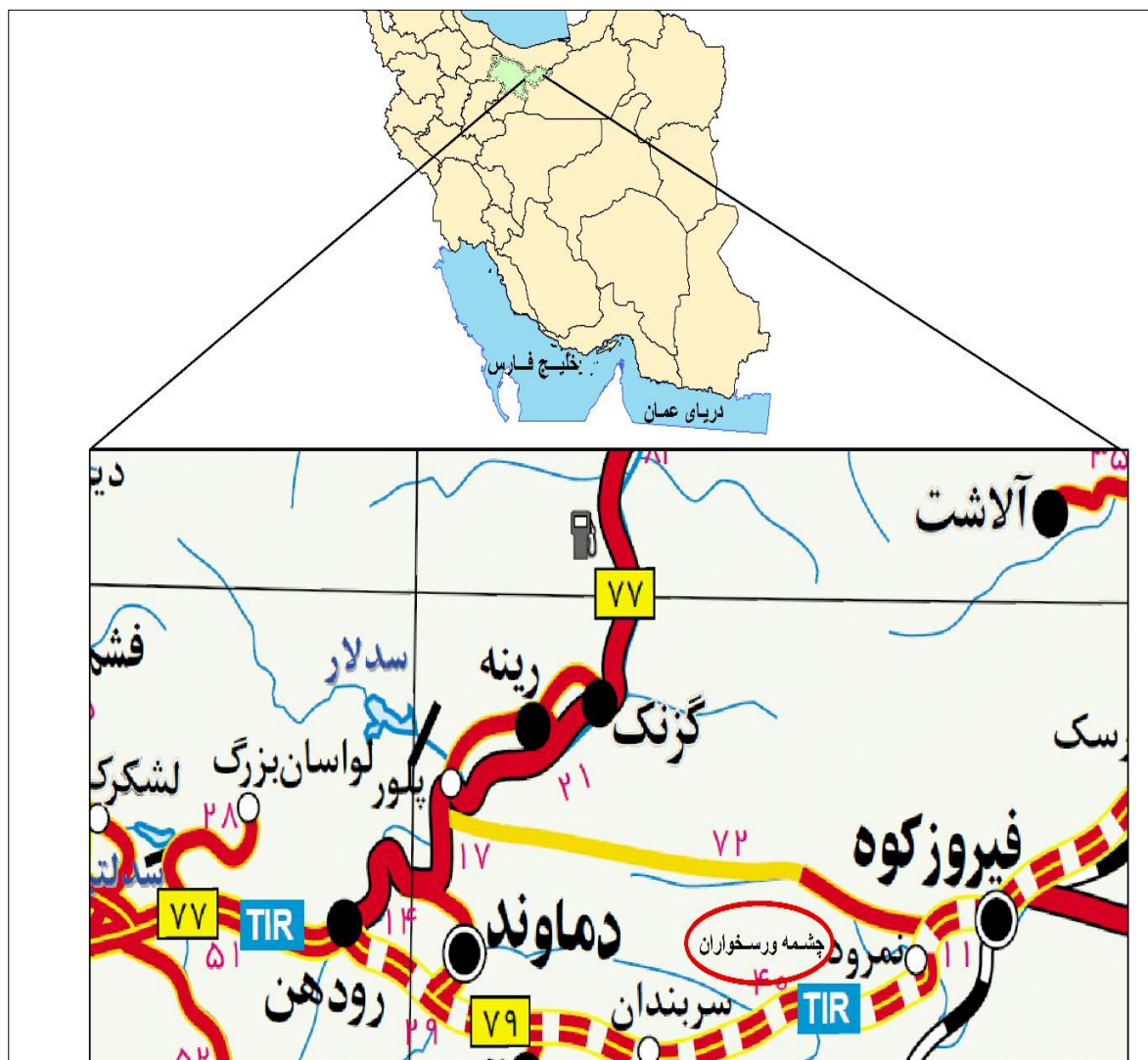
کمبود آب را می‌توان اصلی‌ترین ویژگی شرایط اقلیمی ایران توصیف نمود. کشور ایران با متوسط بارش ۲۵۰ میلی‌متر در سال، جزء مناطق خشک جهان محسوب می‌شود. منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت، رشد صنعتی کشورها و کافی نبودن منابع آب سطحی به یک منبع بسیار مهم و با ارزش تبدیل شده است، به طوری که آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب بسیاری از شهرها و روستاها می‌باشد. امروزه کاهش بارندگی، افت شدید سطح ایستابی در دشت‌ها و آلودگی منابع آب زیرزمینی سبب شده است تا توجه متخصصین به تأمین آب از منابع آبی پایدار معطوف گردد.

در این راستا آبخوان‌های کربناته یکی از مهم‌ترین و همچنین کارآمدترین منابع آبی پایدار جهان محسوب می‌شوند. در حال حاضر سازندهای کربناته آب شرب مورد نیاز بسیاری از شهرهای جهان را تأمین می‌کنند. سازندهای کربناته در صورت کارستی شدن همواره می‌توانند حجم بالایی آب را در خود ذخیره کند و به عنوان یک منبع غنی عمل کنند (Andreo et al. 2010).

چشمه ورسخواران یکی از مهم‌ترین چشمه‌های کارستی شهرستان فیروزکوه است که دارای ارزش تاریخی می‌باشد. مردم محلی از آب این چشمه برای شرب و آبیاری زمینهای کشاورزی، استفاده می‌کنند، همچنین باقیمانده آب خروجی از چشمه پس از عبور از کنار روستای ورسخواران و ملحق شدن به رودخانه اصلی نمرود در مخزن سد نمرود ذخیره می‌شود. با توجه به اینکه تاکنون هیچ مطالعه‌ای بر روی این منبع آبی پایدار انجام نشده است، لذا به منظور ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیائی چشمه کارستی ورسخواران تحقیقی بر روی این چشمه کارستی صورت گرفت. برای تحقق اهداف ذکرشده، بایستی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه کارستی ورسخواران حداقل به مدت یک سال به صورت ماهانه اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گیرند. همچنین به منظور بررسی زمین‌شناسی و ارزیابی توسعه فضاهای انحلالی و سایر عوارض ژئومورفولوژی کارست بازدیدهای صحرایی از حوضه آبرگیر چشمه الزامی است.

۱-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

چشمه کارستی ورسخواران به عنوان یکی از مهم‌ترین چشمه‌های شهرستان فیروزکوه در ۲۸ کیلومتری غرب این شهرستان در روستای ورسخواران واقع شده است. حوضه آبریز این چشمه در شمال روستای ورسخواران و در کوه قره‌داغ قرار دارد. محدوده مورد مطالعه، چشمه کارستی ورسخواران و حوضه آبریز آن می‌باشد که مختصات جغرافیایی آن $35^{\circ}42'28''$ تا $35^{\circ}45'23''$ عرض شمالی و $52^{\circ}26'14''$ تا $52^{\circ}33'37''$ طول شرقی می‌باشد. چشمه‌های مهمی دیگری نیز از کوه قره‌داغ منشأ می‌گیرند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به چشمه رخس، اشاره نمود. شکل (۱-۱) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه را از طریق شهرستان فیروزکوه نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه

۱-۳- آب و هوای منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی شرایط آب و هوایی و وضعیت اقلیمی منطقه مورد مطالعه از آمار چهارساله ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه و ایستگاه‌های باران‌سنجی نمرود، کهنک و نجف در استفاده شده است. جدول (۱)-۱) مشخصات ایستگاه‌های مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در اطراف محدوده مورد مطالعه

| ردیف | نام ایستگاه | نوع ایستگاه | حوضه آبرگیر | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | ارتفاع (m) |
|------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|------------|
| ۱ | نجفدر | باران سنجی | نمرود | ۵۲-۰۳ | ۳۵-۵۲ | ۲۳۸۸ |
| ۲ | کهنک | باران سنجی | دلیچای | ۵۲-۲۹ | ۳۵-۴۱ | ۲۳۲۱ |
| ۳ | نمرود | باران سنجی | نمرود | ۵۲-۳۹ | ۳۵-۴۳ | ۱۸۱۶ |
| ۴ | فیروزکوه | سینوپتیک | فیروزکوه | ۵۲-۴۴ | ۳۵-۴۵ | ۱۹۷۵ |

جدول ۱-۲- داده‌های درجه حرارت ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳

| سال | ۱۳۹۳ | ۱۳۹۲ | ۱۳۹۱ | ۱۳۹۰ |
|-----------------|------|------|------|------|
| فروردین | ۸ | ۸/۹ | ۷/۷ | ۸/۲ |
| اردیبهشت | ۱۳/۳ | ۱۱/۳ | ۱۲/۴ | ۱۴/۲ |
| خرداد | ۱۸ | ۱۷/۶ | ۱۷ | ۱۹ |
| تیر | ۲۱ | ۲۰/۷ | ۲۰ | ۲۲ |
| مرداد | ۱۳/۵ | ۲۰/۸ | ۲۰ | ۷ |
| شهریور | ۱۷ | ۱۹ | ۱۷/۹ | ۱۷ |
| مهر | ۱۲/۷ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۲ |
| آبان | ۵/۵ | ۶ | ۷/۷ | ۳/۳ |
| آذر | -۰/۱ | ۰/۹ | -۱/۸ | -۱/۹ |
| دی | -۱/۷ | -۲/۷ | -۲/۳ | -۱ |
| بهمن | -۱/۱ | -۱/۸ | ۲/۴ | -۴/۶ |
| اسفند | ۱/۲ | ۳/۸ | -۴/۲ | -۱/۹ |
| حداکثر | ۲۱/۲ | ۲۰/۸ | ۲۰/۲ | ۲۲/۳ |
| حداقل | -۱/۷ | -۲/۷ | -۲/۳ | -۴/۶ |
| میانگین سالیانه | ۹ | ۹/۸ | ۱۰ | ۷/۹ |

جدول ۱-۳- میانگین بارش در ایستگاه سینوپتیک و باران سنجی اطراف محدوده مورد مطالعه از سال آبی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۰

| بارش ماهانه (mm) | | | | | | | | | | | | سال | ایستگاه | |
|------------------|-------|-----|-------|----------|---------|-------|------|----|-----|------|-----|-----|---------|------------------------|
| شهریور | مرداد | تیر | خرداد | اردیبهشت | فروردین | اسفند | بهمن | دی | آذر | آبان | مهر | | | بارش سالانه (mm) |
| ۸ | ۳ | ۳۰ | ۰ | ۳۱ | ۶۱ | ۲۰ | ۱۳ | ۱۱ | ۰ | ۱۳۵ | ۶ | ۳۱۶ | ۱۳۹۰ | نمرود |
| ۱۶ | ۱۷ | ۲۵ | ۵ | ۲۴ | ۲۱ | ۳۹ | ۴۳ | ۱۲ | ۲۸ | ۵۳ | ۶ | ۲۸۵ | ۱۳۹۱ | نمرود |
| ۰ | ۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۲۴ | ۱۶ | ۱۸ | ۵ | ۸ | ۵۳ | ۵۴ | ۰ | ۲۱۱ | ۱۳۹۲ | نمرود |
| ۵۹ | ۲ | ۲۴ | ۰ | ۵ | ۴۱ | ۴۱ | ۷۶ | ۰ | ۳۰ | ۳۵ | ۷ | ۳۱۹ | ۱۳۹۳ | نمرود |
| ۳ | ۱۶ | ۱۴۷ | ۳۱ | ۸۴ | ۱۶۴ | ۱۱ | ۴۶ | ۲۶ | ۰ | ۱۱۴ | ۶ | ۶۴۸ | ۱۳۹۰ | نجفدر |
| ۴۸ | ۲۷ | ۱۷ | ۰ | ۹۲ | ۲۵ | ۶۳ | ۷۰ | ۱۰ | ۴۰ | ۱۳۴ | ۱۰ | ۵۳۶ | ۱۳۹۱ | نجفدر |
| ۰ | ۰ | ۲۸ | ۷۷ | ۱۲۵ | ۷۳ | ۴۱ | ۶ | ۲ | ۹۰ | ۵۱ | ۰ | ۴۹۳ | ۱۳۹۲ | نجفدر |
| ۲۱ | ۳ | ۲۹ | ۲۷ | ۱۶ | ۱۶۶ | ۷۰ | ۱۲۵ | ۵ | ۵۸ | ۳۵ | ۱۸ | ۵۷۳ | ۱۳۹۳ | نجفدر |
| ۱۶ | ۱ | ۴۵ | ۵ | ۳۷ | ۵۵ | ۱۰ | ۳۹ | ۱۲ | ۱۴ | ۱۰۲ | ۷ | ۳۴۳ | ۱۳۹۰ | فیروزکوه |
| ۱ | ۲۵ | ۱۷ | ۲ | ۳۲ | ۱۶ | ۳۱ | ۳۸ | ۴ | ۲۴ | ۳۴ | ۶ | ۲۳۰ | ۱۳۹۱ | فیروزکوه |
| ۰ | ۰ | ۱۵ | ۲۸ | ۲۷ | ۱۴ | ۱۴ | ۶ | ۶ | ۳۷ | ۵۰ | ۰ | ۱۹۶ | ۱۳۹۲ | فیروزکوه |
| ۵۴ | ۵ | ۳۰ | ۱۱ | ۲ | ۴۷ | ۲۹ | ۶۹ | ۲ | ۳۶ | ۲۹ | ۶ | ۳۱۹ | ۱۳۹۳ | فیروزکوه |
| ۰ | ۵ | ۳ | ۲۱ | ۱۷ | ۴۰ | ۳۶ | ۷۶ | ۲۳ | ۰ | ۱۴۳ | ۲ | ۳۶۴ | ۱۳۹۰ | کهنک |
| ۷ | ۹ | ۲۲ | ۷ | ۶۰ | ۵۹ | ۸۶ | ۱۱۰ | ۱۶ | ۵۶ | ۵۱ | ۳ | ۴۸۵ | ۱۳۹۱ | کهنک |
| ۰ | ۶ | ۳۲ | ۵۳ | ۳۸ | ۹۷ | ۵۲ | ۹ | ۸ | ۸۵ | ۸۷ | ۰ | ۴۶۷ | ۱۳۹۲ | کهنک |
| ۰ | ۰ | ۳ | ۰ | ۲ | ۱۴ | ۱۰ | ۶ | ۰ | ۰ | ۲۹ | ۰ | ۱۹۶ | | حداقل |
| ۵۹ | ۲۷ | ۱۴۷ | ۷۷ | ۱۲۵ | ۱۶۶ | ۸۶ | ۱۲۵ | ۲۶ | ۹۰ | ۱۴۳ | ۱۸ | ۶۴۸ | | حداکثر |
| ۱۹ | ۹ | ۴۰ | ۲۴ | ۴۷ | ۷۰ | ۴۱ | ۵۷ | ۱۰ | ۴۰ | ۷۴ | ۶ | ۴۱۵ | | میانگین |

در مقیاس کلی آب و هوای شهرستان فیروزکوه همانند سایر بخش‌های استان تهران در فصل‌های سرد سال متأثر از سیستم‌های شمالی و شمال غربی و غربی به ویژه جنوب غربی بوده و ریزش‌های جوی آن که از ماه‌های آبان و آذر آغاز و تا اواسط اردیبهشت‌ماه ادامه دارد، تابعی از فعالیت‌های سیستم‌های فوق می‌باشد.

داده‌های دمای و بارش ایستگاه‌های ذکر شده از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۰ به ترتیب در جدول (۲-۱) و (۳-۱) ارائه شده است. متوسط بارندگی ماهانه با نتیجه‌گیری از داده‌های چهار ساله ایستگاه مذکور بین ۹ میلی‌متر در مردادماه تا ۷۰ میلی‌متر در فروردین‌ماه متغیر است. میزان متوسط بارندگی سالیانه در ایستگاه‌های مذکور در حدود ۴۱۵ میلی‌متر در سال می‌باشد و همچنین با توجه به جدول (۲-۱) حداکثر و حداقل درجه حرارت ماهیانه در ایستگاه فیروزکوه در دوره آماری چهار ساله به ترتیب ۲۲ و ۴- درجه سانتیگراد است.

در این مطالعه به منظور بررسی هرچه بهتر وضعیت اقلیمی منطقه از نمودار آمبروترومیک و ضریب اقلیمی دمارتن نیز استفاده شد است. در ادامه این نمودارها مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند.

۱-۳-۱- نمودار امبروترومیک

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 برای سال آبی ۹۳-۹۴ بر اساس داده‌های ایستگاه فیروزکوه رسم و در شکل (۲-۱) ارائه شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که بین اردیبهشت‌ماه تا مهرماه تغییرات دما بر بارندگی فزونی دارد و این بازه زمانی 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 کوه قره‌داغ از این میزان نیز کمتر باشد.

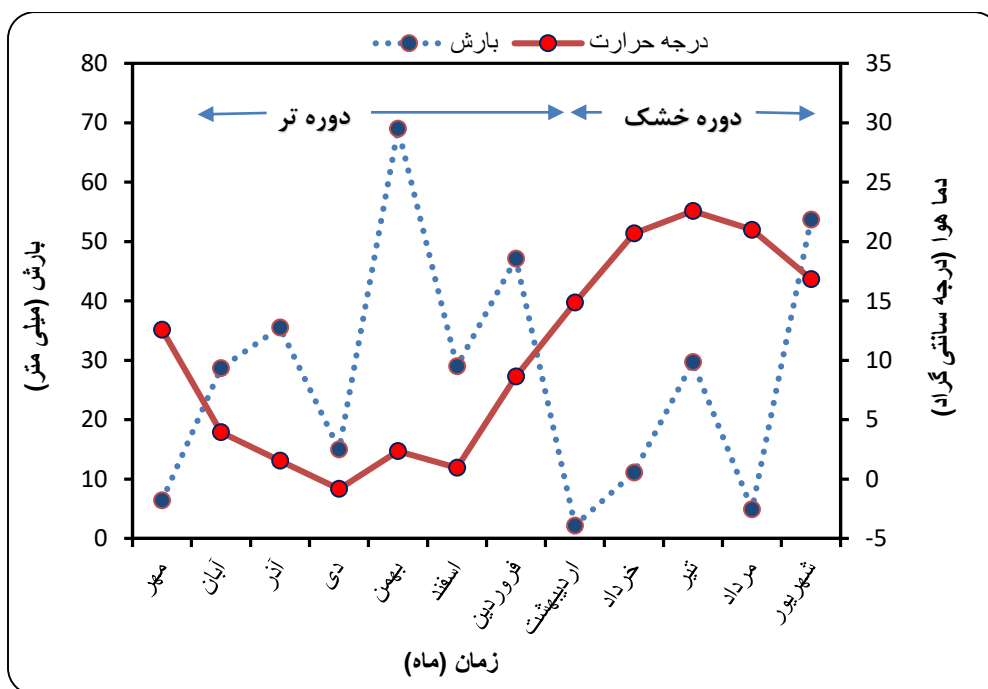
۱-۳-۲- ضریب اقلیمی دمارتن

این ضریب با توجه به عنصر اقلیمی به کار رفته در آن (متوسط دما و بارش سالیانه) و تعیین یک مقدار عددی برای یک منطقه، می‌تواند نوع آب و هوای آن منطقه را مشخص نماید. دمارتن (De Martonne)

با استفاده از متوسط بارندگی (P) و دمای سالیانه (T) معادله (۱-۱) را برای ضریب اقلیمی ارائه نموده است. (علیزاده، ۱۳۸۴).

$$I = \frac{P}{(T+10)} \quad \text{معادله ۱-۱}$$

در این رابطه P متوسط بارندگی سالیانه بر حسب میلی‌متر و T متوسط دمای سالیانه بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشد. در جدول (۱-۴)، طبقه‌بندی دما رتن برای شش نوع آب و هوای غالب آورده شده است. برای منطقه مورد مطالعه ضریب اقلیمی برابر با ۱۶/۲ محاسبه شد و بر اساس طبقه‌بندی دما رتن جدول (۱-۴)، اقلیم منطقه در رده نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. ارتفاع یکی از عوامل مؤثری است که باعث افزایش ضریب اقلیمی دما رتن در منطقه می‌شود به طوری کلی با افزایش ارتفاع دما کاهش و بارش افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش میزان بارش در ایستگاه‌های نجفدر و کهنک و همچنین کاهش دما در نتیجه افزایش ارتفاع آنها، ضریب اقلیمی دما رتن در منطقه افزایش و در رده مدیترانه‌ای قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۲- نمودار امپروترمیک منطقه مورد مطالعه

جدول ۱-۴- طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن (علیزاده ۱۳۸۹)

| نام اقلیم | محدوده ضریب خشکی دمارتن (I) |
|-------------|-----------------------------|
| خشک | کوچکتر از ۱۰ |
| نیمه‌خشک | ۱۰ تا ۱۹/۹ |
| مدیترانه‌ای | ۲۰ تا ۲۳/۹ |
| نیمه مرطوب | ۲۴ تا ۲۷/۹ |
| مرطوب | ۲۸ تا ۳۴/۹ |
| بسیار مرطوب | بزرگتر از ۳۵ |

۱-۴- زمین‌شناسی منطقه

عدم پیچیدگی زمین‌شناسی ارتفاعات قره‌داغ به گونه‌ای است که شرایط مناسبی جهت مطالعه منطقه مهیا می‌سازد. منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی ساختمانی مربوط به بخش جنوبی زون البرز مرکزی می‌باشد و عمدتاً سازندهای زمین‌شناسی آن مربوط به دوران مزوزوئیک تا سنوزوئیک می‌باشد. روند ساختاری چین‌ها تقریباً شمال شرقی - جنوب غربی بوده و با امتداد گسل‌ها منطقه (مشا - فشم و نمرود) موازی می‌باشند.

۱-۴-۱- چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی

هدف این بخش شناسایی واحدهای چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی و بررسی نقش آن‌ها بر روی سیستم‌های هیدروژئولوژیکی در محدوده می‌باشد. سازندهای تشکیل‌دهنده حوضه آبگیر چشمه ورسخواران عمدتاً از نظر سنی مربوط به دوران مزوزوئیک تا سنوزوئیک می‌باشند و جنس اکثر آن‌ها کربناته می‌باشد. رخساره مردابی شمشک قدیمی‌ترین سازند منطقه می‌باشد که بر روی آن سازندهای آهکی دلیچای، لار و رسوبات آهکی کرتاسه فوقانی قرار گرفته است. رسوبات آبرفتی عهد حاضر نیز به صورت واریزه‌های دامنه‌ای، در پای ارتفاعات و آبراهه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. وضعیت لایه‌های مذکور

به خوبی در مقطع زمین‌شناسی منطقه نشان داده شده است. این مقطع در امتداد خط A-B تهیه شده است که در نقشه زمین‌شناسی منطقه نیز مشخص است شکل (۱-۳). در ادامه لیتولوژی، سن، حدود پایینی و بالایی سازندها، رخنمون سطحی و موقعیت آنها توضیح داده می‌شود. لیتولوژی، سن، حدود پایینی و بالایی سازندها، رخنمون سطحی و موقعیت آنها در منطقه مورد مطالعه به شرح ذیل می‌باشد.

۱-۴-۱-۱ واحدهای ژوراسیک

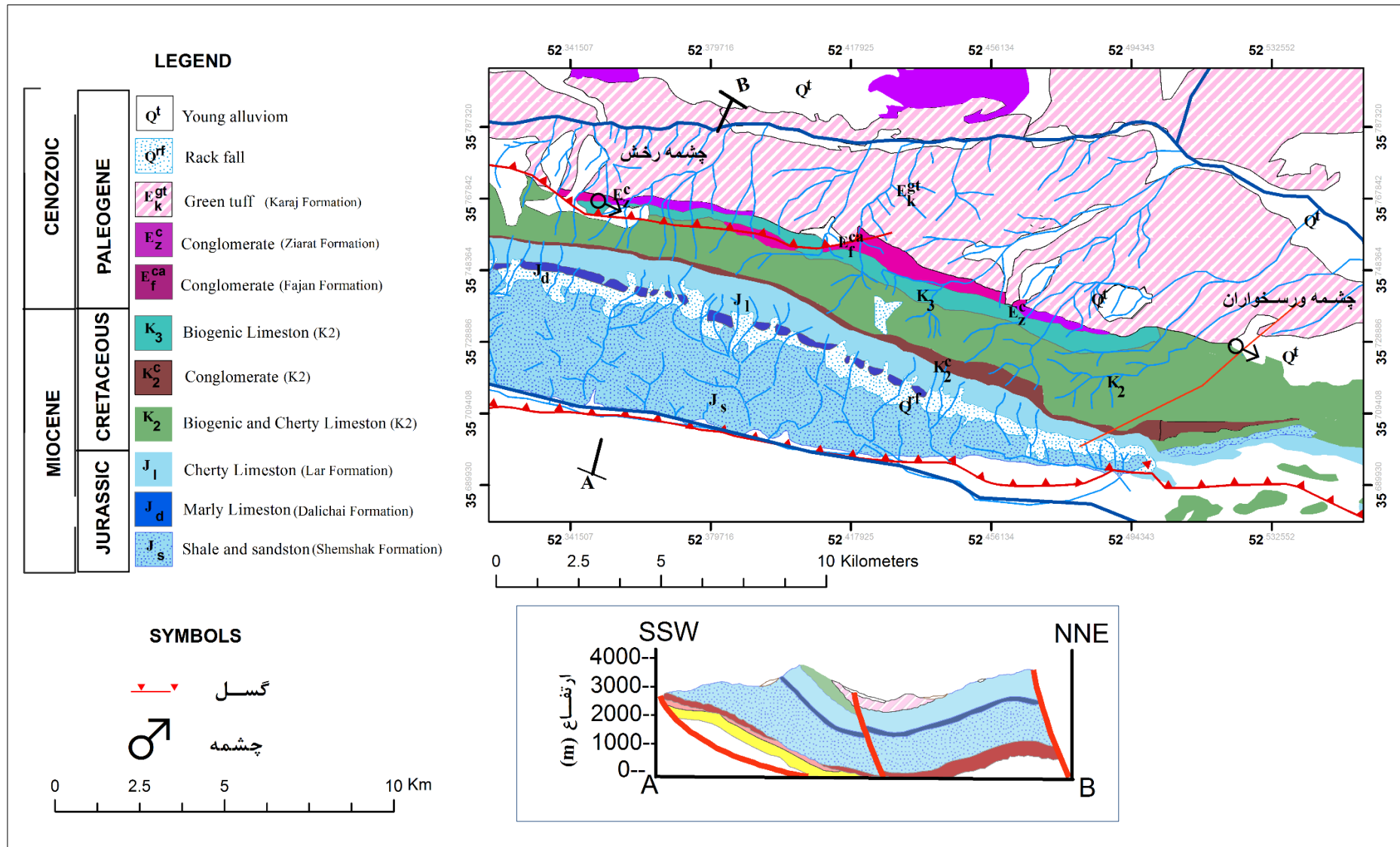
سازند شمشک

سازند شمشک یکی از گسترده‌ترین رسوباتی است که در ایران و در شمال راندگی زاگرس ته‌نشین شده است و قسمت اعظم لیتولوژی آن از رس - ماسه‌ای می‌باشد. این سازند شامل ماسه‌سنگ، سیلتستون، شیل و کلیستون است. ضخامت کل این سازند ۱۰۲۷ متر و از نظر جغرافیایی سازند شمشک وسعت بزرگی از شمال و مرکز و شرق ایران را می‌پوشاند. حد فوقانی سازند شمشک، بدون مرز واضحی به سازند دلیچای ختم می‌شود و حد زیرین سازند شمشک در مقطع نمونه، روی بخش D سازند جیروود قرار گرفته است. و در همه مقاطع سطح تماس زیرین آن با درگرسیبی فرسایشی مشخص می‌شود. سازندهای متعلق به ژوراسیک در البرز میانی از رخساره‌های مردابی، قاره‌ای و دریاچه‌ای حاوی آثار گیاهی فراوان تشکیل شده‌اند و نشان می‌دهند که در این زمان در سراسر این مناطق جنگل‌های انبوه وجود داشته است. به طور کلی رخساره لیاس در البرز تناوبی از لایه‌های ماسه‌سنگ، شیل و سنگ‌های رسی است که در بین آنها لایه‌های زغال‌دار با ضخامت متفاوت قرار دارند (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). در منطقه مورد مطالعه همان طور که در مقطع و نقشه زمین‌شناسی و بازدیدهای صحرائی مشاهده شد، سازند شمشک قدیمی‌ترین سازند زمین‌شناسی می‌باشد که در دامنه جنوبی کوه قره‌داغ رخنمون دارد، این سازند بر اثر راندگی گسل مشا-فشم به سمت جنوب رانده شده است و به دلیل ناتراوا بودن مانع هیدروژئولوژیکی به شمار می‌آید. پس می‌توان گفت که به دلیل وجود این سازند در پایین‌ترین بخش از ارتفاعات قره‌داغ ارتباط هیدروژئولوژیکی بین دامنه جنوبی با دامنه شمالی وجود ندارد و آب کارستی موجود در حوضه آبگیر باید از دامنه شمالی و از طریق چشمه‌ها موجود تخلیه گردد.

سازند دلیچای

مقطع نمونه این سازند، در ساحل راست رودخانه دلیچای واقع شده است. ضخامت آن ۱۰۷ متر و از نظر لیتولوژی شامل آهک‌مارنی تا ماسه‌ای لایه نازک به رنگ سبز خاکستری است که در آن گاهی شیب مارنی به صورت بین لایه‌ای دیده می‌شود. در زیر سازند دلیچای، سازند شمشک با کنتاکت هم‌شیب قرار دارد که در آن می‌توان تغییر و تبدیل سریع لایه‌های ماسه‌ای شمشک به لایه‌های آهکی دلیچای را مشاهده کرد. سطح فوقانی سازند دلیچای هم به تدریج به آهک لار به رنگ روشن ختم می‌شود. حد زیرین سازند دلیچای به سازند شمشک ختم می‌شود این حد یکنواخت نیست و از جایی به جای دیگر فرق می‌کند. همین مسئله در مورد حد فوقانی آن نیز صدق می‌کند (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

سازند آهکی دلیچای در منطقه بر روی سازند شمشک قرا گرفته همانند آن بر اثر راندگی گسل مشا- فشم به سمت شمال شیب پیدار کرده است. رخنمون این سازند نیز در دامنه جنوبی ارتفاعات قره‌داغ مشاهده می‌گردد. این لایه آهکی را می‌توان به عنوان بخشی از آبخوان احتمالی چشمه ورسخواران در نظر گرفت البته این لایه به دلیل تراوایی اندک می‌تواند تأثیرات قابل توجهی روی خصوصیات فیزیکی‌شیمیایی چشمه داشته باشد. این لایه در ترسیم حوضه آبگیر چشمه ورسخواران بخشی از حوضه آبگیر چشمه محسوب می‌شود.



شکل ۱-۳- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دماوند و ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان و بازیدهای صحرایی)

سازند آهکی لار

از لحاظ لیتولوژی، شامل آهک‌های نازک لایه میکربیتی تا توده‌ای، ولی متراکم به رنگ خاکستری روشن است و حاوی قلوه‌های و یا لایه‌های چرتی به رنگ سفید تا بنفش کم‌رنگ است. ضخامت آن بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ متر گزارش شده است. حد زیرین سازند آهکی لار به تدریج به سازند دلیچای به رنگ خاکستری ختم می‌شود. حد بالایی آهک‌های لار با یک دگرشیبی زاویه‌دار و سطح فرسایشی قابل توجه، در زیر آهک‌های اربیتولین‌دار سازند تیزکوه، یا آهک کرتاسه فوقانی و حتی ترسیری قرار می‌گیرد. از لحاظ گسترش جغرافیایی، آهک لار از البرز شرقی در شاهرود - سمنان شروع و تا فیروزکوه و البرز مرکزی ادامه پیدا می‌کند. ضخامت آن در البرز شرقی حدود ۱۰۰۰ متر، ولی همان طوری که در بالا ذکر شده است، در دره لار به ۲۵۰ تا ۳۵۰ متر کاهش می‌یابد. به علاوه، از شمال البرز به سمت جنوب نیز افزایش ضخامت در آن محسوس است. به سمت مغرب از ضخامت آن به تدریج کاسته می‌شود و در دره منجیل به کلی از بین می‌رود (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

بررسی‌های پتروگرافی سازند لار در ارتفاعات جنوبی بهشهر در استان مازنداران و دره هزار استان تهران نشان می‌دهند که فرایند دولومیتی شدن به طور گسترده این سازند را تحت تأثیر قرار داده است. (اصغری و همکاران ۱۳۹۳، غضنفری، ۱۳۹۵).

در منطقه مورد مطالعه سازند لار نیز جزئی از آبخوان چشمه کارستی ورسخواران محسوب می‌گردد. این لایه آهکی دولومیتی بر روی سازند دلیچای قرار دارد و از شیب آن تبعیت می‌کند و همچنین رخنمون این سازند همانند سازند دلیچای در دامنه جنوبی قابل مشاهده می‌باشد. این دو سازند حدود ۳۵ درصد از حوضه آبگیر چشمه ورسخواران را در دامنه جنوبی تشکیل می‌دهند. اگرچه سازند لار و دلیچای از نظر برخی خصوصیات چینه‌شناسی از هم تفکیک می‌شوند ولی از آنجا که در بین این دو لایه، هیچ مانع هیدرولیکی وجود ندارد از نظر علم هیدروژئولوژی می‌توان آن‌ها را به عنوان یک آبخوان یا واحد هیدرواستراتیگرافی معرفی نمود که می‌توانند بر اساس جنس و ضخامت و دیگر ویژگی‌ها تأثیراتی را بر روی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه ورسخواران داشته باشد.

۱-۴-۱-۲- واحدهای کرتاسه فوقانی

واحدهای این دوران شامل سازندهای آهکی کرتاسه فوقانی می‌باشند که عموماً در نقشه‌های زمین‌شناسی نیز با این نام شناخته می‌شود. در حد بین سازند تیزکوه و رسوبات کرتاسه فوقانی (سنومانین)، انفصال رسوبی یا دگرشیبی مشخصی وجود دارد که به حرکات کوهزایی استرین ارتباط داده می‌شود، به نحوی که رسوبات سنومانین در اغلب موارد از آهک‌های آلی تخریبی حاوی بیروزوا تشکیل یافته، حتی گاهی باقاعده‌ای بر روی سازند تیزکوه یا آهک‌های لار قرار گرفته است. اشتیگر (e.g Tiger) با مطالعه زمین‌شناسی مغرب فیروزکوه رسوبات کرتاسه بالایی را به صورت زیر معرفی کرده است.

تشکیلات C₂، شامل آهک میکریتی و اسپارایتی است که در برخی جاها با کنگلومرای قاعده‌ای آغاز می‌شود. ضخامت آن ۰ تا ۱۲۰ متر و کنتاکت آن با سازند تیزکوه نامشخص و تدریجی است.

تشکیلات C₃، اصولاً شامل آهک به ضخامت ۰ تا ۳۰۰ متر است و به صورت پیش‌رونده بر روی C₂ و یا سازند تیزکوه و حتی بر روی آهک لار قرار دارد.

تشکیلات C₄، شامل آهک آلی-تخریبی به ضخامت تقریبی ۳۲۰ متر است. کنتاکت زیرین آن با C₃ دگرشیبی زاویه‌دار و در برخی جاها با گدازه‌های بازیک و یک کنگلومرای قاعده است، ولی در بعضی مناطق تدریجی و نامشخص است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

واحد آهکی کرتاسه از جمله سازندهایی است که در منطقه به طور کامل رخنمون یافته و این واحدها بر روی سازند لار قرار گرفته است. همانطور که در نقشه زمین‌شناسی مشاهده می‌شود این واحدها حدود ۶۵ درصد از مساحت ارتفاعات قره‌داغ را به خود اختصاص می‌دهند. علیرغم سازندهای آهکی لار و دلیچای این واحدها در دامنه شمالی رخنمون دارند، به طوری که سازند آهکی کرتاسه خط‌الرأس حوضه آبگیر نمرود می‌باشد که آن را از دامنه جنوبی یعنی حوضه دلیچای جدا نموده است.

سازند فجن

ضخامت آن در مقطع نمونه حدود ۱۵۰۰ متر و از نظر لیتولوژی شامل کنگلومرای پلی ژنتیک، ماسه سنگ قرمز و مارن‌های ماسه‌ای است و در آن تناوبی از آگلومرا و گدازه‌های آندزیتی هم دیده می‌شود. در زیر سازند فجن، سازند تیزکوه به حالت دگرشیبی زاویه‌دار قرار دارد، در کنتاكت فوقانی سازند فجن هم سازند زیارت به حالت هم‌شیب دیده می‌شود.

سن این سازند به علت عدم وجود فسیل کاملاً مشخص نیست، ولی در منطقه فیروزکوه، با توجه به وجود لایه‌های فرامینفردار از اوایل تا اواسط ائوسن در نظر گرفته می‌شود (Ashtvoklyn, 1966). در برخی نواحی، کنگلومرای فجن با رابطه بین‌انگشتی به سازند زیارت تبدیل می‌شود، به این دلیل جدایی بین آن‌ها همیشه امکان‌پذیر نیست. به نظر اشتوکلین (Ashtygr, 1972) سازند فجن با برخی از کنگلومرای شرقی ایران که با نام کنگلومرای کرمان از آن یاد می‌شود با لایه‌های قرمز پستلیق در کپه‌داغ، معادل است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

این سازند به طور کلی در حوضه آبگیر گسترش نداشته و به صورت پراکنده در برخی از نقاط ناودیس قره‌داغ مشاهده می‌شود. این سازند با توجه به جنس آن، مرز حوضه آبگیر چشمه ورسخواران را تشکیل می‌دهد.

سازند کرج

مقطع نمونه سازند کرج در دره کرج کنار جاده چالوس، در دو مقطع انتخاب و مطالعه شده است. به نظر واتان و یاسینی (Vatan and Yasini, 1969)، این سازند کاملاً استثنایی تقریباً در تمام حجم خود از مواد آذرآواری زیردریایی تشکیل شده که همراه آن از طرفی مواد آتش‌فشانی و نفوذی نظیر گدازه، دایک، سیل، آگلومرا و غیره و از طرفی دیگر مواد رسوبی واقعی نظیر شیل و آهک دیده می‌شود. آنچه در این سازند اهمیت دارد توف‌های سبزرنگی است که در نتیجه راسب شدن موارد حاصل از انفجار آتش‌فشانی در نزدیکی سطح دریا به وجود آمده است. ضخامت کل مقطع نمونه ۳۳۰۰ متر می‌باشد. به طور کلی سن سازند کرج از اواسط تا اواخر ائوسن میانی و در برخی نقاط ممکن است تا اواخر ائوسن

تخمین زده شود. کنتاكت زیرین سازند كرج با سازند زیارت هم‌شیب، ولی کنتاكت فوقانی آن در دهكده كند با دگرشیبی فرسایشی همراه است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

۴-۱-۴- رسوبات آبرفتی كواترنری

طی دوره نئوژن، حرکات مهم تكتونیکى ناشی از كوهزایی‌های آلپی، شكل و وضع حوضه‌های رسوبی را تغییر داد و سبب شد تا برخی از پادگان‌های آبرفتی نسبت به سطح اساس فرسایش محلی تا ۲۰۰ متر بالاتر قرار گیرند (نبوی، ۱۳۵۵). در واقع موقعیت قرارگیری این آبرفت‌ها، خود معرف اهمیت فرسایش رودخانه‌ای و حرکات قائم به ویژه در البرز می‌باشد در عین حال می‌تواند شاهدهی بر حرکات شدید تكتونیکى و تغییرات آب‌وهوایی در پهنه کشور به حساب آید (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

پادگان‌های آبرفتی یا تراس‌ها

در اطراف تهران، پادگان‌های آبرفتی متعدد دیده می‌شود که از آن جمله می‌توان به پادگان‌های کنار رودخانه جاجرود، دره لار، مشرق پارچین، كند بالا و لشكرک اشاره نمود. ضخامت برخی از تراس‌های اطراف تهران به ۴۰ الی ۲۰۰ متر می‌رسد. از عوامل پیدایش تراس‌های آبرفتی تهران می‌توان، اثر جنبش‌های كوهزایی مداوم در ایران و وجود باران‌های شدید در ارتباط با مراحل یخچالی را نام برد (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

۱-۵- زمین‌شناسی ساختمانی محدوده مورد مطالعه

منطقه البرز در شمال سرزمین ایران، یکی از كمربندهای كوهزایی فعال می‌باشد که با طول تقریبی ۶۰۰ كيلومتر از كوه‌های تالش در غرب تا كپه‌داغ در شرق کشیده شده است. پهنای این كمر بند بین ۶۰ تا ۱۲۰ كيلومتر می‌باشد. و در حاشیه جنوبی خزر قرار گرفته است (عباسی، ۱۳۸۸). منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی ساختمانی بخشی از زون البرز مرکزی می‌باشد که در دامنه جنوبی این زون واقع شده است

(درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

۱-۵-۱- چین خوردگی‌ها

چین خوردگی‌ها به دلیل نقشی که در هدایت آب و بروز سیماهای کارستی دارند در مطالعات هیدروژئولوژیکی حائز اهمیت می‌باشند. درزه‌هایی که در خط‌الرأس تاقدیس و در محور ناودیس تشکیل می‌شوند به همراه پدیده انحلالی در آنها نقش مهمی در حرکت، چرخه آب و جهت جریان عمومی در سیستم‌های کارستی ایفا می‌کنند.

منطقه مورد مطالعه به طور کلی روی یال ناودیس قره‌داغ قرار گرفته است. ساختمان این ناودیس به علت عملکرد گسل مشا-فشم تحت تأثیر راندگی قرار گرفته است. سازندهای منطقه توالی متشکل از رسوبات مزوزوئیک و سنوزوئیک می‌باشند و به‌طور عمده دارای شیب تند به سمت شمال هستند. بیشترین ارتفاع حوضه آبگیر چشمه ورسخواران از سطح دریا ۴۰۸۰ متر بوده و شیب عمومی هیدروژئولوژیکی در آن از جنوب به شمال و شرق می‌باشد.

۱-۵-۲- گسل‌ها

مطالعه گسل‌ها به دلیل عامل اصلی راندگی‌ها و اهمیتی که در ایجاد تخلخل ثانویه، هدایت و نفوذ آب به سازند کربناته دارند ضروری می‌باشد. همچنین آن‌ها را با توجه به سازوکارشان و تحلیل نوع جابه‌جایی نیز مورد مطالعه قرار می‌دهند به دلیل این که می‌توان بر اساس نوع سازوکار گسل را به عنوان مانع یا ارتباط دهنده هیدروژئولوژیکی تلقی نمود. عمدتاً گسل‌هایی که تحت تأثیر نیروهای فشاری ایجاد می‌شوند به عنوان مانع هیدروژئولوژیکی تلقی می‌شوند و گسل‌هایی که در مناطق کششی ایجاد می‌شوند به‌عنوان عامل ارتباط‌دهنده هیدرولیکی معرفی می‌شوند.

گسل مشا - فشم

در دامنه جنوبی البرز، در حدفاصل آبیگ - فیروزکوه گسلی از نوع راندگی وجود دارد که دست‌کم از زمان لیاس (نبوی، ۱۳۵۵) تاکنون، بر حوضه رسوبی، ساختار کهن و به‌ویژه ریخت زمین‌ساخت امروز البرز اثر درخور توجه داشته است. گسل مشا - فشم در حقیقت یک پهنه گسلی به پهنای حدود ۱۰ کیلومتر و طول حدود ۴۰۰ کیلومتر است. خط گسل موجدار است، در شمال باختری دارای روند WNW- ESE می‌باشد. در بخش مرکزی به تدریج خمیده می‌شود ولی در خاور، روند خاوری - باختری

دارد. شیب صفحه گسلی، متناسب با نوع سنگ‌های مجاور، بین ۳۵ تا ۷۰ درجه به سمت شمال متغیر است (شکل ۱-۲). آسرتو (Aserto, 1966) این گسل را از انواع ژرف و بنیادی البرز می‌داند که در بعضی نواحی بالا رانده (Upthrust) و در بعضی نقاط رو رانده (Overthrust) است. اشتوکلین (Ashtvklyn, 1966)، آخرین تاریخ حرکت این گسل را به سن پلیوسن - پلیستوسن می‌داند، چالنگو (Chalnk, 1974)، این گسل را از نوع لرزه زا می‌داند (به نقل از آقناباتی، ۱۳۸۳).

گسل فیروزکوه

این گسل را می‌توان ادامه گسل مشا - فشم در نظر گرفت که با راستای شمال خاوری - جنوب باختری و درازای ۳۵ کیلومتر در فاصله کمتر از یک کیلومتری جنوب فیروزکوه قرار دارد. شیب این گسله به سوی جنوب خاوری است و در بخش باختری آن سنگ‌های سازند لار، رسوبات پالئوژن و کنگلومرای‌های نئوژن بر روی رسوبات آبرفتی کواترنر دشت فیروزکوه رانده شده‌اند. رسوبات جوان کواترنر در شمال خاوری فیروزکوه به طور آشکار توسط این گسل بریده شده‌اند.

گسل مشا - فشم را می‌توان اصلی‌ترین عامل به وجود آوردند ژئومورفولوژی منطقه محسوب نمود که با روراندن رسوبات مزوزوئیک، سنوزوئیک و ایجاد درزه و شکاف ثانویه در یال ناودیس قره‌داغ زمینه به وجود آمدن سیستم هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی ورسخواران را کلید زده است. علاوه بر این در بازدیدهای صحرائی و عکس‌های هوایی مشخص شد که چشمه کارستی ورسخواران در اثر عملکرد یکی از شاخه‌های فرعی گسل مشا - فشم که یال ناودیس قره‌داغ را قطع کرده ظاهر شده است. طی بررسی‌های انجام شده نوع سازوکار این شاخه فرعی از گسل مشا - فشم معکوس تشخیص داده شد است. از این پس این شاخه فرعی را گسل ورسخواران می‌نامیم. شکل (۴-۱) موقعیت گسل ورسخواران و نمایی از مظهر چشمه کارستی ورسخواران را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۴- موقعیت گسل ورسخواران و نمایی از آهک کرتاسه فوقانی در محل مظهر چشمه کارستی

ورسخواران

گسل نمرود

همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی مشخص شده است در محور ناودیس نمرود یک گسل مشاهده می‌شود که پس از بررسی مقطع زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای نوع سازوکار آن معکوس تشخیص داده شد است. با توجه به این که گسل‌های معکوس در علم هیدروژئولوژی تا حدودی به‌عنوان مانع هیدروژئولوژیکی تلقی می‌شوند این گسل می‌تواند توجیه‌کننده جریان زیرزمینی ناودیس به سمت شرق، یعنی، به سمت چشمه کارستی ورسخواران باشد.

۱-۶- ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه

با توجه به ارتباط نزدیک اشکال ژئومورفولوژیکی مناطق کارستی و تکامل آبخوان کارستی، بررسی‌های ژئومورفولوژی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند. گسترش سازندهای آهکی با ضخامت زیاد، آب و هوای

مساعد توسعه کارست و تکتونیک فعال، شرایط نسبتاً مناسبی برای ایجاد و گسترش سیستم هیدژئولوژیکی در محدوده مورد مطالعه فراهم آورده است. طی بازدیدهای صحرایی، سیمای متنوع کارستی مانند سنگ‌های برهنه، حفرات انحلالی مختلف لایه یا کارن (Karren)، دولین (Doline) و چشمه‌های کارستی
کارستی
بزرگ (Karst springs) در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده است. وجود چشمه‌های بزرگ و کوچک همچون ورسخواران، رخس نشان دهنده توسعه شبکه کارستی به صورت مجاری زیرزمینی در ارتفاعات قره‌داغ می‌باشد.

۷-۱- هیدرولوژی منطقه

منابع آب سطحی در شهرستان فیروزکوه شامل رودخانه‌هایی می‌باشد که بخشی از آب آن‌ها از کوه‌های قره‌داغ سرچشمه گرفته و پس از طی مسیر خود در مخزن سد نمرود ذخیره می‌شوند. رودخانه نهرود و دلیچای دو رودخانه دائمی هستند که به ترتیب از دامنه شمالی ارتفاعات قره‌داغ و در دامنه جنوبی این ارتفاعات جاری می‌شوند. این دو رودخانه پس از ملحق شدن به یکدیگر به سمت شهرستان گرمسار جاری می‌شوند.

ارتفاعات منطقه مورد مطالعه از شمال جزء حوضه آبخیز نهرود و از جنوب جزء حوضه آبخیز دلیچای محسوب می‌شود. مساحت حوضه نهرود ۸۱۲/۶ کیلومتر مربع می‌باشد. در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبخیز ایران حوضه نهرود جزء زیر حوضه فیروزکوه محسوب می‌شود که در نهایت آب‌های آن به سمت کویر مرکزی ایران جاری می‌شوند. رودخانه نمرود با طول تقریبی ۳۰ کیلومتر از حوالی روستای زرمان سرچشمه گرفته و با ملحق شدن چندین چشمه با نام‌های رخس، دوبرار در جهت شمال غربی - جنوب شرقی به سمت جاری می‌شود. و پس از عبور از کنار روستا سلوقون و ملحق شدن چشمه ورسخواران به آن، در نهایت در مخزن سد نمرود ذخیره می‌شود. از دیگر منابع آب سطحی اطراف چشمه ورسخواران، مخزن سد نهرود، می‌باشد که در فاصله حدود سه کیلومتری شرقی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۸- هیدروژئولوژی منطقه

کوه قره‌داغ که ارتفاعات آن حوضه آبگیر چشمه‌ی ورسخواران در جنوب شرقی آن را تشکیل می‌دهد، یک منطقه کارستی نسبتاً توسعه‌یافته می‌باشد. تقریباً تمام حوضه آبگیر منطقه را سازندهای آهکی تشکیل می‌دهند که این وسعت از لایه‌های آهکی می‌تواند بخشی از نزولات جوی را از طریق عوارض کارستی موجود در لایه‌های کارستی به درون زمین انتقال داده و از طریق چشمه‌های کارستی تخلیه نمایند.

آبخوان حوضه آبگیر چشمه ورسخواران از طریق چند چشمه تخلیه می‌شود که هیچ آماری در مورد تخلیه سالیانه آن در دسترس نیست ولی آنچه در بازدیدها و نمونه‌برداری‌های مشاهده شد آب کارستی موجود در آبخوان کوه قره‌داغ از طریق یک چشمه اصلی در انتهای شرق یال ناودیسی به نام ورسخواران با متوسط آبدهی $1/4$ مترمکعب بر ثانیه و یک چشمه در شمال شرقی به نام رخس با حداکثر آبدهی 500 لیتر بر ثانیه تخلیه می‌شود و این احتمال وجود دارد که این دو چشمه از یک آبخوان تخلیه شوند. همچنین به دلیل شیب لایه‌ها و موقعیت قرارگیری سازند ناتراوای شمشک در منطقه هیچ‌گونه ارتباط هیدروژئولوژیکی بین ارتفاعات قره‌داغ و دامنه جنوبی آن وجود ندارد و همه آب‌های کارستی آبخوان قره‌داغ از دامنه شمالی و از طریق چشمه‌های ذکرشده تخلیه می‌شوند.

در بررسی‌های به‌عمل‌آمده از منطقه مشخص گردید به دلیل مرتفع بودن کوه قره‌داغ و همچنین تأمین آب منطقه از طریق چشمه‌ها، هیچ‌گونه چاه یا پیزومتر در حوضه آبگیر چشمه حفر نشده است.

فصل دوم

مروری بر مطالعات پیشین

کشور ما به دلیل واقع شدن روی کمربند خشک و نیمه‌خشک، 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 بحرانی‌تر شده است. همچنین در سال‌های اخیر به دلیل توسعه کشاورزی غیراصولی و بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی، سطح تراز آب زیرزمینی در اکثر دشت‌ها پایین افتاده و با بحرانی شدن وضع در سال‌های اخیر شاهد مطرح شدن مسائلی همچون مدیریت منابع آبی پایدار و یا در برخی موارد احیای منابع آب زیرزمینی هستیم که گویای وضعیت پیشرو می‌باشد.

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 مشکلات زیست‌محیطی از قبیل آلودگی آب، فرونشست، جاری شدن سیل، تغییرات در 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 شاهد کاهش شدید منابع آبی چشمه‌ها و یا خشک شدن کامل برخی در کشورمان هستیم که از عوامل بروز آن 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 پارامترهای فیزیکوشیمیایی چشمه‌های کارستی جهت مشخص نمودن خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدرژئوشیمیایی چشمه‌ها می‌باشد. از این‌رو در این فصل، به مرور مطالعاتی در زمینه طبقه‌بندی مناطق کارستی، ژئومورفولوژی نواحی کارستی، جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی، بررسی هیدروگراف و ضریب بده چشمه‌های کارستی، تغذیه در کارست و روش‌های تعیین حدود حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی پرداخته شده است.

۱-۲- تعریف و اهمیت کارست

به طور کلی در تعریف اولیه، کارست به مجموعه نماهای انحلالی سطحی و زیرسطحی 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 نمود.

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 سنگ‌آهک، دولومیت، مارن و ژیپس (به ویژه سنگ‌آهک) در آب‌های طبیعی است.

در تعریف دیگری کارست به گستره‌ای با مورفولوژی 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 سنگ‌آهک) توسعه پیدا می‌کنند و علاوه بر این بر روی دیگر سنگ‌ها که قابلیت انحلال دارند (از قبیل سنگ گچ و نمک) نیز ایجاد می‌شوند (Karami, 2002).

در علم ژئومورفولوژی، کارست شامل همه سنگ‌های انحلال‌پذیر است که آب به درون آن‌ها نفوذ کرده، درون آن‌ها را انحلال داده و حفرات بادوام ایجاد نماید. از طرفی سنگ‌های نواحی کارستی باید استحکام مکانیکی زیادی داشته باشند تا از ریزش‌ها سریع در حفرات ایجاد شده اجتناب شود و به عبارت دیگر باید دارای مسیری باشند که مواد انحلال یافته از سیستم خارج شود. در مواردی سطوح انحلالی را می‌توان در برخی سنگ‌ها آذرین (بازالتی، گرانیتی) نیز مشاهده نمود که توسط آب ایجاد شده است در این موارد، تأثیر آب تا اعماق زیاد ادامه نمی‌یابد زیرا مجاری انحلالی به سرعت به وسیله فراورده حاصل از انحلال، ریزش یا دگرسانی پر می‌شوند (Gilli, 2015).

از نظر هیدروژئولوژیست‌ها کارست نتیجه تأثیر آب بر سطوح سطحی و زیرسطحی می‌باشد. کارست در این تعریف عمدتاً به واحدهای کربناته اطلاق می‌شود. هرکجا که سیستم هیدروژئولوژیکی در سطح یا زیر سطح حفراتی اندکی ایجاد نماید و به واسطه آن گردش آب در آن ایجاد شود و به شکل آبخوانی که دارای نواحی تغذیه و نقاط تخلیه (چشمه) است درآید، کارست گفته می‌شود (Gilli, 2015).

در بیشتر نقاط جهان آب‌های کارستی مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب مورد نیاز برای آشامیدن، کشاورزی، صنعت و غیره می‌باشند. به عبارتی حدود ۱۵ درصد از خشکی‌های زمین را سازندهای

کربناته تشکیل می‌دهند (Bin, 2003). حدوداً ۲۹ درصد از جمعیت جهان از منابع آبی آن استفاده می‌کنند (Gilli, 2015) و همچنین سازندهای کربناته حدود ۱۳ درصد از سطح کشور را تشکیل می‌دهند که شرایط مناسبی برای توسعه منابع آبی در کشور ایجاد کرده است (بهنیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۴).

۲-۲- طبقه‌بندی مناطق کارستی

یکی از اولین طبقه‌بندی‌های کارست توسط سویجیک (Cvijic, 1926) ارائه شد که این محقق کارست را بر اساس عامل مورفولوژی به سه نوع کارست کامل (Holo karst)، کارست ناقص (Mero karst) و کارست انتقالی (Transitional karst) تقسیم‌بندی 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 و برهنه بدون زمین قابل کشت و یا بدون وجود گیاهان، چهره‌های بسیار خاصی به نواحی کارست کامل می‌دهند.

کارست‌های ناقص به نواحی کارستی گفته می‌شود که در آن‌ها 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 نمی‌شود. حفره‌های فروکش غیرمتداول بوده و پلژه‌های کارستی وجود ندارند. این نوع کارست معمولاً کارست پوشیده نیز نامیده می‌شود.

کارست‌های انتقالی در حدواسط 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 به‌خوبی توسعه داشته ولی پلیه‌های (Polje) کارستی وجود ندارند.

مانژین (Mangin, 1975) یک سیستم طبقه‌بندی بر اساس ضریب ماندگاری (K) و ضریب نفوذ (I) برای سیستم‌های کارستی معرفی کرده است. به این ترتیب سیستم‌های 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 بالادست توسعه یافته است
- نوع ۴: سیستم‌های کارستی پیچیده
- نوع ۵: سیستم‌های کارستی با توسعه یافتگی ضعیف یا بیشتر با سیستم کارستی غیرفعال

برخی دیگر از محققین، مناطق کارستی را با توجه به پیچیدگی‌های موجود در آن، از دیدگاه‌های تکتونوتیکی، مورفولوژی، زمین‌شناسی ساختمانی، زمان تشکیل، سطح اساس فرسایش، موقعیت لایه‌های ناتراوا و پوشش خاک تقسیم‌بندی نموده‌اند. نکته کلیدی در تقسیم‌بندی سیستم‌های کارستی این است که در هر منطقه با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی آن، شرایط زمین‌شناسی از نظر نوع جنس، ساختمان لایه‌ها و شرایط اقلیمی، درجه تحول مشخصی دارد که خود ناشی از عوامل مؤثر بر آن‌ها می‌باشد که خاص آن مناطق است. لذا تقسیم‌بندی‌های متعددی در کارست مشاهده می‌شود؛ که هر یک خاص مناطق مشخص می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های پدیده‌های کارستی که خود ناشی از عوامل مؤثر بر آن‌ها می‌باشد محققین مختلف تقسیم‌بندی‌های متفاوتی ارائه نموده‌اند (ملکی، ۱۳۸۰).

۳-۲- ژئومورفولوژی نواحی کارستی

شناخت پدیده‌های ژئومورفولوژی که در اثر انحلال ایجاد شده‌اند، با داشتن اطلاعاتی از شرایط آب و هوایی منطقه می‌تواند کمک قابل توجهی به شناخت سیستم‌های کارستی نماید. وایت (White, 1988) اشکال کارستی را به دو دسته اصلی شامل اشکال سطحی (دره کارستی، چشمه، پونور، حفرات انحلالی، آبفروچاله، پولیه، چاهک و غیره) و اشکال زیرسطحی (غارها، مجاری زیرسطحی، رسوبات غار) تقسیم‌بندی نموده است.

پیچیدگی و ناهمگنی بودن سیستم‌های کارستی باعث شده که در دهه‌های اخیر رویکرد عمده جهت تفسیر خصوصیات مناطق کارستی، استفاده از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منابع آب از جمله چشمه‌ها و پیزومترهای موجود در این نواحی باشد. چشمه‌های کارستی مهم‌ترین عارضه‌های کارستی می‌باشند به گونه‌ای که آب خروجی از آن‌ها دربردارنده خصوصیات جریان در مناطق کارستی می‌باشد. بسیاری از خصوصیات کارست با مطالعه چشمه‌های کارستی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (کریمی

وردنجانی، ۱۳۸۹). در این مطالعه با توجه به موضوع آن، تنها به تشریح چشمه‌ها کارستی پرداخته شده است. چشمه‌ها شامل مجموعه‌ای از مسیرهای زیرسطحی بوده که در نهایت به صورت خروجی در سطح زمین ظاهر می‌شوند. پس می‌توان آن‌ها را در هر دو دسته اشکال سطحی و زیرسطحی جای داد.

۱-۳-۲- چشمه‌های کارستی

به ظهور طبیعی آب زیرزمینی در سطح زمین، چشمه می‌گویند به عبارت دیگر، در صورتی که سطح آب زیرزمینی در آبخوان توسط عامل نفوذناپذیر قطع گردد، آب زیرزمینی به صورت چشمه ظاهر می‌شود (Bonacci, 1987). عامل تخلیه اختلاف بار هیدرولیکی بین آبخوان و سطح زمین در نقطه تخلیه می‌باشد. چشمه‌ها از این نظر حائز اهمیت هستند که مقدار متناوبی از آب زیرزمینی را زهکشی می‌نمایند و بدون صرف انرژی در اختیار بشر قرار می‌دهند. از نظر منزر (Meinzer, 1927) اگرچه تمام چشمه‌ها (به جز برخی بر اثر فعالیت‌های آتشفشان جوان و فعالیت‌های هیدروترمال که در آن تخلیه بر اثر گرا دیان دمایی صورت می‌گیرد) نهایتاً در سطح زمین، به دلیل نیروی گرانش تخلیه می‌شوند. چشمه‌ها معمولاً بر اساس بار هیدرولیکی، در نقطه تخلیه نسبت به آبخوان به دو گروه اصلی ثقلی (Gravity springs) و آرتزین (Artesian springs) تقسیم‌بندی می‌شوند (Kresic and Stevanovic, 2010).

چشمه‌ها بر اساس معیارهای مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. بوگلی (Bogli) چشمه‌ها را بر اساس شرایط زمین‌شناسی و تکتونیک، جریان خروجی و مکانیسم خروج آب تقسیم‌بندی نموده است (Bonacci, 1987).

چشمه‌ها بر اساس مکانیسم خروج آب (چه عاملی باعث شده که آب از چشمه خارج شود) به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱- چشمه‌های کنتاکتی یا تماسی: این چشمه‌ها در محل برخورد لایه غیرقابل نفوذ در زیر آبخوان با سطح زمین، اگر آب کم باشد در محل کنتاکت (Contact) خارج می‌شوند. اگر آب خیلی زیاد باشد یک یا چند چشمه در بالادست و یک چشمه در پایین دست تشکیل می‌گردد. چشمه‌های بالادست به صورت

سریز

(Over flow contact) هستند و معمولاً در تابستان آبدهی کاهش یافته و یا به طور کامل خشک می‌شود.

۲- چشمه‌های سدی: آب در حال حرکت است یک مانع اجازه عبور به آن را نمی‌دهد آب در نزدیک مانع بر اساس بار هیدرولیکی مجبور به خارج شدن می‌شود. بر اساس نوع مانع (چینه‌شناسی یا زمین‌شناسی، گسل، رسوبات دانه‌ریز رودخانه، آب‌شور) که چه نوعی باشد به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شود.

۳- چشمه‌های آرتزین: این چشمه‌ها آب‌های زیرزمینی تحت فشار را در سطح زمین ظاهر می‌سازند. حرکت آب در این نوع چشمه‌ها، از درون سفره‌ای صورت می‌گیرد که روی آن یک یا چند لایه غیرقابل نفوذ قرار دارد. پس عامل فرار آب می‌تواند گسل و یا وجود لایه‌های غیرقابل نفوذ باشد. حوضه آبرگیر در این چشمه‌ها در محلی دوردست و خارج از لایه غیرقابل نفوذ، واقع شده است.

چشمه‌های کارستی آب زیرزمینی یک منطقه کارستی را از طریق شکاف‌های فعال هیدروژئولوژیکی زهکشی می‌نمایند، جریان‌ها از طریق سنگ‌های نفوذناپذیر به سطح زمین انتقال پیدا می‌کند غالباً در مناطق کارستی چشمه‌ها در سطح تماس توده کربناته و لایه نفوذناپذیر ظاهر می‌شوند (Bonacci, 1987). آنچه در مورد چشمه‌های کارستی باید به آن توجه نمود، این است که تعدادی از چشمه‌های در مناطق کارستی از نوع چشمه‌های کارستی سطحی هستند و به همین دلیل در مواقعی که بخواهیم در برنامه‌ریزی از آب چشمه استفاده نمایم باید بررسی نمایم که چشمه کارستی از نوع سطحی نبوده، بلکه از نوع عمقی باشد. نکته دیگری که بازهم در مورد چشمه‌های کارستی مهم است این است که آب چشمه‌های کارستی، اغلب از نظر آلودگی، به ویژه آلودگی‌های باکتریولوژی، قابل اطمینان نیست، مگر این که در حوضه آبرگیر آن‌ها منبع آلوده کننده‌ای وجود نداشته باشد (به نقل از نخعی، ۱۳۸۳). ظرفیت و مشخصه هیدرولوژیکی چشمه‌های کارستی به عواملی از قبیل مساحت حوضه آبرگیر، آب و هوای منطقه، تخلخل مؤثر آبخوان، عوارض مورفولوژیکی کارست در حوضه آبرگیر و جنس لیتولوژی وابسته است (Kresic and Stevanovic, 2010).

۴-۲- جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی

در آبخوان‌های کارستی جریان آب زیرزمینی از طریق فضاهاى خالی، درزه، شکستگی، مجاری لوله مانند و دیگر کانال‌های بزرگ انحلالی انتقال می‌یابد. از آنجایی که مجاری انتقال‌دهنده جریان به طور یکسان توزیع نشده‌اند، آبخوان‌های کارستی به طور کلی ناهمگن (Heterogeneous) و ناهمسانگرد (Anisotropic) هستند. از این‌رو 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 ماتریکس با درزه شکافی 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).

۱-۴-۲- سیستم جریان در آبخوان‌های کارستی

در طول ده‌های گذشته مطالعاتی روی تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها 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 شد است. محققین دیگر از طریق 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) دسته‌بندی نموده‌اند (به نقل از Karami, 2002).

برای مثال اتکینسون (Atkinson, 1977) طبق بررسی‌های خود در منطقه‌ی مندپ هیل (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. و یا در مثالی دیگر رئیسی و کرمی (Raеisi and Karami, 1997) 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 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 (به نقل از کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹) (Raеisi and Karami, 1997).

اگرچه در بیشتر آبخوان‌های کارستی هر دو جریان افشان و مجرای مشاهده می‌شوند. در برخی سیستم جریان افشان یا 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 (Conduit) تا کاملاً افشان (Diffuse) 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 ۱-۲- محدوده تغییرات جریان در محیط‌های کارستی

| | | | |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Full Diffuse Flow System | Conduit – Diffuse Flow System | Diffuse – Conduit Flow System | Full Conduit Flow System |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|

۲-۵- ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی

برخی خصوصیات هیدروژئولوژیکی که در آبخوان‌های کارستی مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارتند از: درجه توسعه یافتگی توده کارستی، تعیین جهت جریان و نوع سیستم جریان در آن، مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، نوع تغذیه سیستم کارستی، شیب هیدرولیکی و عوامل کنترل جریان در آبخوان

کارستی. از این رو برای بررسی توده کارستی روش‌های مختلفی ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. بررسی توأم تغییرات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی در یک دوره‌ی زمانی یکی از روش‌های رایج، نسبتاً کم‌هزینه و مطمئن ارزیابی هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی می‌باشد (به نقل از خسروی سوادجانی، ۱۳۹۰).

مطالعه آبخوان‌های کارستی بر اساس روش‌هایی که مبنای آن‌ها بررسی هیدروگراف چشمه‌های کارستی است از دو نظر اهمیت دارد. اول، به این دلیل که، فرم و شکل تخلیه یک دیدگاه کلی درباره ویژگی‌های آبخوان، نظیر طبیعت ذخیره، قابلیت انتقال و حجم ذخایر دربردارنده جریان ایجاد می‌کند. دوم، پیش‌بینی آبخوان جهت مدیریت منابع آب امری ضروری می‌باشد (Ford and Williams, 2007).

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. در بسیاری موارد هیدروگراف چشمه مشابه هیدروگراف جریان‌های سطحی می‌باشد، این حالت در سفره‌های آزاد که نسبت به ورودی‌ها سریع‌تر عکس‌العمل نشان می‌دهند مشاهده می‌شود. آبخوان‌های دارای دزه و شکاف فراوان، آبخوان‌های کارستی نمونه‌هایی هستند که در آن‌ها تخلیه در زمان کوتاهی پس از تغذیه اتفاق می‌افتد. با توجه به ذخیره سازی بالا در آبخوان‌های کارستی در دراز مدت، دو یا چند سال متوالی با بارش کمتر از میانگین (روند منفی بارش) می‌تواند باعث تخلیه تدریجی سفره آب شود. در واقع این کسری ناشی از کاهش ذخیره سازی، تخلیه در سال‌های بعد را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Fiorillo and Guadagno, 2010).

تجزیه و تحلیل منحنی فروکش یک ابزار اولیه در تحقیقات هیدرولوژیکی است اگرچه این روش بیش از یک قرن استفاده می‌شود اما دائماً در حال تغییر و گسترش می‌باشد (به نقل از Tang et al, 2015). مطالعه نوسانات منحنی فروکش (Recession curves) از زمان آغاز هیدروژئولوژی مدرن که در آن زمان داده‌های جمع‌آوری شده به صورت دستی پردازش می‌شدند برای اولین بار توسط بوسینگ و مایلت (Boussinesq, 1904 and Maillet 1905) انجام شد و سهم بزرگی از آنالیزهای منحنی فروکش یا منحنی تقلیلی (Depletion curves) توسط شولر، دروگ و منگن (Schoeller 1967, Drogue 1972,) (Mangin, 1970) صورت گرفت و مانژین (Mangin) بعدها در سال (1970, 1975) سهم خیلی مهم‌تری در توسعه این روش داشت (Civita, 2008).

رفتار چشمه و نرخ تخلیه آن مرتبط با تغذیه و نوسازی (Replenishment) از سطح و از طریق تغذیه (بارندگی، ذوب برف، نفوذ از آب سطحی) می‌باشد. شدت پاسخ چشمه می‌تواند با مدت زمان نفوذ متغیر باشد. روند و مدت زمان تأخیر جریان به سمت چشمه فقط مرتبط با شدت تغذیه می‌باشد و شدیداً مشروط به خصوصیات خود آبخوان (شکل حوضه و آبخوان) می‌باشد. برای چشمه‌های کارستی به ویژه این روند شدیداً متأثر از حالت کارستیفیکیشن (Karstification) و توسعه یافتگی آبخوان می‌باشد. رفتار هیدوردینامیکی سیستم کارستی مشروط به وضعیت اشباع افق‌های مختلف سیستم می‌باشد. یک طغیان در چشمه می‌تواند به فازهای مختلف تقسیم شود که به صورت زیر تشریح می‌شود. (Civita, 2008).

۱- منحنی صعودی یا (Rising curve) که مشخص کننده فاز نخست تخلیه می‌باشد با یک افزایش در تخلیه و پاسخ خیلی متفاوت مرتبط با فاکتورهای بی‌شمار مثل شدت تغذیه ساعتی، پوشش کارستی، حضور حفره‌های بلعنده یا تغذیه نقطه‌ای روی کارست برهنه و یا نوع شبکه زهکشی می‌باشد.

۲- نقطه اوج آبدهی (Flood peak) می‌باشد و برای هر چشمه منفرد دارای شکل مختلف بوده و دارای مدت زمان مختلف می‌باشد.

۳- منحنی فروکش (Recession curve) توضیح دهنده کاهش تدریجی در تخلیه می‌باشد. و معمولاً این امکان وجود دارد بخش اولیه با روند کاهشی مشخص شود، و به نام منحنی سقوط (Falling curve) نامیده می‌شود و ادامه منحنی دارای کاهش آرام‌تر می‌باشد به نام منحنی تقلیل (Depletion curve) و یا منحنی فرسودگی (Exhaustion curve) نامیده می‌شود.

به طور کلی تأثیرات مجاری با جریان متلاطم و آرام (Turbulent and Laminar) روی هیدروگراف چشمه بسیار متفاوت می‌باشد مخصوصاً زمانی که، ذخیره شبکه مجاری نادیده گرفته شود. جریان متلاطم تنها قسمت‌های اولیه منحنی فروکش را تحت تأثیر قرار می‌دهد و با کاهش تخلیه چشمه ناپدید می‌شود. مجاری با جریان آرام (Laminar) همیشه به اندازه مجاری با جریان متلاطم (Turbulent) روی تخلیه چشمه اهمیت دارند به علاوه تأثیرات مجاری با جریان متلاطم با تخلیه چشمه و با شدت بارش کاهش می‌یابد در حالی که تخلیه چشمه همیشه تحت تأثیر مجاری با جریان آرام قرار می‌گیرند (Chang et al, 2014)

در این میان نظرات مخالف و یا متناقضی هم وجود دارد. برای مثال از دیدگاه شوستر و جنین (Jeannin and Sauter, 1998) تحلیل ساختار آبخوان و طبقه‌بندی سفره آب به وسیله هیدروگراف، به طور کامل انجام نمی‌شود به دلیل این که فرم هیدروگراف بیشتر تحت‌تأثیر بارش و شدت آن قرار دارد. بارش اصلی‌ترین عاملی است که روی شکل هیدروگراف تأثیر می‌گذارد، بارش بخصوص شدت و مدت آن، یک الگوی منحصر به فردی از سیگنال ورودی فراهم می‌کند و چشمه یک طرح و الگویی از فرم اصلاح شده توسط عوامل انتقال دهنده جریان ارائه می‌کند (Ford and Williams, 2007).

هیدروگراف چشمه، بخصوص منحنی فروکش آن به طور گسترده برای درک اطلاعات داخلی آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود. در حقیقت هیدروگراف یک چشمه انعکاسی از پاسخ آبخوان نسبت به تغذیه می‌باشد. هیدروگراف چشمه منعکس کننده میزان بارش تجمعی است که از ابتدای رژیم بارش رخ داده است. (Fiorillo and Guadagno, 2010, Tang et al, 2015).

رحیمی‌دهکردی و کرمی (۱۳۹۲) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه کارستی پیرغار یکی از مهم‌ترین چشمه‌های تاقدیس سالدوران در جنوب غرب شهرستان فارس، را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. بر اساس اطلاعات هیدروگراف و مقایسه حجم جریان سریع و جریان پایه، ضریب تغییرات بالای پارامترهای فیزیکی و شیمیایی و همچنین ضرایب بالای بده منحنی فرود چشمه دریافتند که جریان غالب این چشمه از نوع مجرای می‌باشد و مشخص شد که این چشمه بخش عمده‌ای از آب موجود در آبخوان کارستی تاقدیس سالدوران را تخلیه می‌کند.

عبدی‌نژاد (۱۳۹۲) در مطالعه چشمه کارستی زرنند در استان زنجان، به بررسی خصوصیات فیزیکی این چشمه بر اساس تحلیل منحنی فرود پرداخت و با استفاده ضریب فروکش در رژیم‌های مختلف، حجم دینامیکی چشمه را محاسبه نمود. با توجه به بررسی صورت گرفته رژیم جریان چشمه از نوع مرکب و مجرای تشخیص داد.

چانگ و همکاران (Chang et al. 2014) اثر شبکه مجرای روی هیدروگراف چشمه‌های کارستی را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتایج دست یافتند که، مجاری با جریان آشفته به شدت ابتدای منحنی فروکش را از طریق تغذیه نقطه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد. قسمت‌های بعدی منحنی عمدتاً به وسیله تغذیه افشان کنترل می‌شود و تأثیر مجاری با جریان متلاطم با تخلیه چشمه ناپدید می‌شود. همچنین

بر اساس نتایج این مطالعه می‌توان دریافت که تأثیرات متفاوت مجاری با جریان متلاطم و آرام روی هیدروگراف به دلیل تفاوت در خصوصیات جریان در این مجاری می‌باشد.

تانگ و همکاران (Tang *et al.* 2015) ضمن تحلیل آزمایشگاهی منحنی فرود چشمه در آبخوان کارستی با سیستم مجرای و شکستگی غالب به این نتایج دست یافتند که، قطر مجاری اصلی چشمه روی منحنی جریان اصلی، تأثیر قابل توجهی دارد و طول فروکش، ضریب فروکش و درجه فروکش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اثر ضخامت زون اشباع روی شکل منحنی فروکش و ضریب آن در اوایل رژیم کم تا ناچیز می‌باشد. شکل منحنی فروکش چشمه تحت تأثیر فاکتورهای هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی (مانند شدت بارش، ناحیه تغذیه، خصوصیات ساختاری و غیره) قرار دارد.

کول و فورد (Cowell and Ford, 1983) با بررسی تغییرات دمایی چشمه‌های کارستی جنوب آناریو (Ontario) کانادا نشان دادند که دامنه‌ی تغییرات دمای آب در طول یک سال آبی در چشمه‌های کارستی با سیستم جریان مجرای (حدود ۵/۹ درجه سانتی‌گراد) بیشتر از چشمه‌های کارستی افشان (حدود ۱/۳۲ درجه سانتی‌گراد) است و در نتیجه تغییرات دما را به عنوان معیاری برای تشخیص سیستم جریان حاکم در سفره‌ی کارستی بیان نمودند (نقل از خسروی سوادجانی، ۱۳۹۰).

کرمی (۱۳۹۵) طی دو دهه بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی، نرخ تغییرات آبدهی را به عنوان اولویت نخست برای تحلیل و ارزیابی سیستم جریان در مناطق کارستی معرفی نمود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته می‌توان نتیجه‌گیری نمود که آب خروجی از چشمه‌ها کارستی می‌تواند اطلاعات هیدروژئولوژیکی مهمی از آبخوان‌های کارستی را ارائه دهد. اگر چه هیدروگراف چشمه تحت تأثیر ورودی‌ها قرار دارد از منحنی فروکش آن به طور گسترده برای درک اطلاعات داخلی آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود. مجاری با جریان متلاطم به شدت ابتدای منحنی فروکش را از طریق تغذیه نقطه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهند و قسمت‌های بعدی منحنی عمدتاً به وسیله تغذیه افشان کنترل می‌شود. همچنین قطر مجاری اصلی چشمه روی منحنی جریان تأثیر قابل توجهی دارند به طوری که طول فروکش، ضریب فروکش و درجه فروکش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل منحنی فروکش چشمه تحت تأثیر فاکتورهای هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و فیزیوگرافی حوضه آبریز قرار دارد.

۶-۲- ارزیابی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی

بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌های کارستی به جهت ارزیابی جریان در آبخوان‌های کارستی، 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 سوادجانی، ۱۳۹۰).

به منظور مطالعه‌ی وضعیت انحلال کانی‌های مختلف و درصد آن‌ها در آبخوان‌های کارستی، رئیسی و مر

(Raеisi and Moore, 1993) تعداد ۷۲ چشمه واقع در سازند آسماری چهارم را مورد مطالعه قرار داده‌اند. هدایت الکتریکی تمامی این چشمه‌ها، کمتر از ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد، که نشان دهنده‌ی املاح نسبتاً کم آب این چشمه‌ها است. بر این اساس، ایشان به این نتیجه رسیدند که ۸۵ درصد از کل مواد جامد حل شده شامل یون‌های کلسیم، منیزیم و بیکربنات است و بقیه‌ی یون‌ها به ترتیب شامل سولفات، کلر، سدیم و پتاسیم می‌باشد (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹).

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 می‌دهند 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 می‌گیرند، 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 چشمه‌ها کارستی نسبت به کلسیت اشباع بوده درحالی که نسبت به دولومیت تحت اشباع می‌باشند. (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹).

مورال و همکاران (Moral et al. 2008) طی بررسی آبخوان‌های سیرا و سگورا (Sierra de Segura) در کشور اسپانیا فرآیندهای شیمیایی در این آبخوان‌ها را به ترتیب وقوع، انحلال دی‌اکسیدکربن، انحلال کلسیت، انحلال نامتجانس (Incongruent dissolution) دولومیت، خروج دی‌اکسید 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 داری محتوای منیزیم بیشتر پس داری نسبت Mg/Ca بیشتری می‌باشند. آن‌ها از این شاخص برای تعیین درجه توسعه یافتگی هیدروژئوشیمیایی استفاده نمودند.

به طور کلی باتغییرات آبدهی چشمه‌های کارستی برخی خصوصیات هیدرووشیمیایی نیز تغییر می‌کنند. درواقع تغییرات در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در چشمه‌های کارستی از نوع سیستم آبخوان و نوع تغذیه آن نشات می‌گیرد. 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 آبدهی، 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 پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی را ارائه نمودند که مهم‌ترین این پارامترها دبی، هدایت الکتریکی و درجه حرارت آب چشمه می‌باشد 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 مطالعه‌ای تحت عنوان استفاده از داده‌های هیدرووشیمیایی جهت شناسایی سیستم جریان چشمه کارستی اسکرت (Iskrets) در کشور بلغارستان و مقایسه داده‌های هیدرووشیمیایی 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 (Dolina) صورت می‌گیرد.

جانگ و گو (Jiang and Guo, 2010) ضمن مطالعه هیدروولوژیکی، هیدرووشیمیایی و ایزوتوپی روی چشمه کارستی لینگسوی (Lingshui) و با فرض اینکه آلاینده‌های انسان‌زاد از قبیل Cl^- ، Na^+ ، K^+ ، NO_3^- و SO_4^{2-} در آبخوان‌های کم‌عمق بیشتر از آبخوان‌های عمیق می‌باشند به این نتیجه رسیدند که:

آب این چشمه از عمق آبخوان منشأ می‌گیرد و هیچ منبع آلوژنیکی ندارد و همچنین آنالیزهای ایزوتوپی نیز موارد ذکر شده را تأیید نمودند.

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 آبگیر 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 کربنات 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 مؤثر 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.

۲-۷- 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 می‌نمایند (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، ذخیره‌سازی 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 مختلف طبیعی 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 آبرگیر چند چشمه در جنوب اسپانیا مورد استفاده قرار گرفته و توانسته با اختلاف ۵ درصد تغذیه در این نواحی کارستی را محاسبه نماید (Radulovic et al. 2010).

رایسچ و تورن (Reisch and Toran, 2013) در مقاله‌ای تحت عنوان "ناهنجاری ذوب برف بر روی نمودار هیدروشمیایی 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 جابه‌جای 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 (Barberá 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. جزء یک، مربوط به تغذیه افشان از طریق رخنمون‌های کربناته نماینده آب‌هایی با مواد معدنی پایین و فقیر در اکثر پارامترهای شیمیایی و ایزوتوپی، جزء دوم شامل آب آلونیک با دمای پائین و هدایت الکتریکی زیاد و غنی شده از یون‌های (SO_4^{2-} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- , NO_3^-) و جزء 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 فروچاله‌ها، صورت می‌گیرد. و به عوامل مختلف طبیعی 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 دو مورد مشاهده می‌شوند.

۱-۷-۲- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی

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

2015

روش‌های متفاوتی جهت تعیین حوزه آبخیز (Catchment Area) استفاده می‌شوند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌های بیلان هیدرولوژیکی و روش‌های مدل‌سازی، سنجش از دور و ترکیبی اشاره نمود.

۱-۱-۷-۲- روش بیلان هیدرولوژیکی

بناچی (Bonacci, 1993) ضمن بررسی و تعیین حوزه آبخیز چشمه کارستی سواون (Sv.Ivan) در کرواسی، از طریق روش‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی، به این نتایج دست یافت که روش بیلان هیدرولوژیکی مناسب‌ترین روش برای تعیین حوزه آبخیز در نواحی کارستی با داده‌های محدود می‌باشد. وی کاربرد تنوعی از تکنیکها را در تعیین حوزه آبخیز بخصوص در نواحی کارستی را مفید می‌داند. همچنین او برای اطمینان از درستی نتایج از روش‌های ردیابی رادیواکتیو، بیولوژیکی و شیمیایی بهره گرفت است.

بناچی (Bonacci, 1987) از روش هیدروگراف آب زیرزمینی برای تخمین حوزه آبخیز در چشمه سادرو (Sadro) استفاده نمود. این روش شامل محاسبه هیدروگراف چشمه توسط بیلان ریاضی و مقایسه آن با هیدروگراف مشاهده‌ای و تلاش برای مینیمایز کردن اختلاف آن دو با تغییر مساحت حوزه آبخیز می‌باشد. نتایج این مطالعه گویای این است که نرخ‌های تغذیه سالیانه و ماهانه آب زیرزمینی محاسبه شده توسط مدل ریاضی برای تخمین رفتار هیدرولوژیکی حوزه می‌تواند با زمان متغیر باشد. این مسئله برای حوزه‌های کارستی که مرزهای آن تابع زمان می‌باشد بسیار مهم و حیاتی می‌باشد. این موضوع نشانگر این است که مقادیر حوزه آبخیز برای حوزه کارستی نمی‌تواند همواره ثابت باشد بلکه با زمان می‌تواند تغییر کند (Bonacci et al. 2006).

خسروی سوادجانی و کرمی (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی چشمه کارستی امام قیس با منابع آب مجاور از روش بیلان هیدرولوژیکی معکوس جهت تعیین حوزه آبخیز چشمه استفاده نمود.

بناچی (Bonacci, 2015) 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 (Topographic Catchment Area) با حوزه آبخیز هیدرولوژیکی (Hydrological)

Catchment Area) می‌باشد. وی دو روش هیدرولوژیکی ساده را برای محاسبه حوضه آبرگیر پیشنهاد کرد. روش اول تعیین ارتباط بین تخلیه میانگین سالانه با بارندگی سالانه روی حوضه و روش دوم استفاده از فرمول ترک (Turc) می‌باشد.

۲-۷-۱-۲- روش‌های مدل‌سازی، سنجش از دور و ترکیبی

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

حوضه آبرگیر برای آب‌های سطحی بیشتر متأثر از توپوگرافی بوده و در برخی نوشته‌ها به نام حوضه آبرگیر توپوگرافی (Topographic catchment Area) معرفی می‌شود که ساده‌ترین راه برای تخمین اولیه آن استفاده از نقشه‌های توپوگرافی می‌باشد. از طرفی دیگر حوضه آبرگیر برای آب‌های زیرزمینی متأثر از مرزهای هیدرولیکی و یا مرزهای نامرئی می‌باشد که با نام حوضه آبرگیر هیدرولوژیکی (Hydrological Catchment Area) معرفی می‌گردد. در شرایطی که مرزهای توپوگرافی و مرزهای هیدرولیکی بر هم منطبق باشند می‌توان گفت دو حوضه آبرگیر سطحی و زیرزمینی نیز بر هم منطبق می‌باشد. اما زمانی که مرزها بر هم منطبق نباشند و یا در محیط‌های ناهمگن (Heterogen) مثل کارست به دلیل مورفولوژی نامشخص عوارض کارستی و وجود اتصالات زیرزمینی نمی‌توان حوضه آبرگیر توپوگرافی را با حوضه آبرگیر هیدرولوژیکی منطبق دانست. مسئله با در نظر گرفتن مرزهای هیدرولوژیکی که وابسته به زمان می‌باشند، پیچیده‌تر هم می‌شود. بنابر این به منظور تعیین مرزهای هیدروژئولوژیکی بایستی بررسی‌های جامع‌تری از نظر زمین‌شناسی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی صورت گیرد (Bonacci, 2006). دگریرمنس (Degirmenci, 1990) در پژوهشی تحت عنوان تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی اوکوپور (Olukkopru) در ترکیه، از تکنیک‌های سنجش از دور (Remote Sensing) و آنالیزهای هیدروشیمیایی و آنالیزهای ایزوتوپ محیطی به منظور تعیین سیستم‌های تغذیه و تخلیه و بررسی ارتباط بین چشمه‌ها و حوضه‌های چشمه‌های مجاور استفاده نمود.

موسسه تحقیقات مدل‌سازی محیط‌زیست (Enviromental Modeling Research Laboratory) در سال (2002) اقدام به ساخت سیستم مدل‌سازی حوضه آبرگیر (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 سپس نرم‌افزار با دریافت آبراهه‌ها و دریافت محل‌های خروجی اقدام به تهیه مرزهای حوضه آبرگیر 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 را نام برد.

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

بوسچر و هگنبرگر (Butscher and Huggenberger, 2007) در تحقیقی تحت عنوان مفاهیمی برای هیدرولوژی کارست با استفاده از مدل‌سازی 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 زمین‌شناسی (3D Geological) از منطقه مورد مطالعه می‌باشد که با استفاده از نرم‌افزار GOCAD انجام گرفته است، این مرحله برای توصیف و آنالیز هندسه آبخوان و 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 محل‌های 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 آبگیر و لایه خطی مسیر آبراهه‌ها را ارائه نمودند.

۸-۲- مطالعات انجام شده در ارتباط با چشمه‌های کارستی در ایران

مینویی و همکاران (۱۳۸۹)، با بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیائی چشمه‌های کارستی قلوز و تلوکسان در کوه‌های شاهو دریافتند که: ضرایب بده، درجه حرارت و هدایت الکتریکی در هر دو چشمه بیانگر سیستم غالب مجرای است دلیل تغییرات کمتر درجه حرارت و بده در چشمه کارستی تلوکسان در مقایسه با چشمه قلوز به شکل و ابعاد حوضه آبگیر مربوط می‌شود که ابعاد و کشیدگی حوضه چشمه کارستی تلوکسان در مقایسه با چشمه قلوز به طور قابل توجهی بیشتر است همچنین نتایج نشان داد که دلیل بالا بودن ضریب تغییرات غلظت یون‌های اصلی در چشمه تلوکسان توسعه بیشتر کارست در این چشمه نسبت به چشمه قلوز است.

نوری و همکاران (۱۳۸۹)، در مطالعه تعیین سیستم ورودی چشمه کارستی آبدانان، از توابع استان ایلام به این نتایج رسیدند که: تغییرات زمانی خواص فیزیکوشیمیایی آب خروجی از چشمه به طور قابل توجهی اندک می‌باشد به طوری که ضریب تغییرات تمام پارامترها بیانگر غالب بودن جریان افشان در سفره آبدار این چشمه می‌باشد. همچنین شواهد صحرایی (فروچاله، غار و پدیده‌های مورفولوژیکی سطحی) نیز نتایج را تأیید می‌کنند.

محمدی و همکاران (۱۳۹۱)، چشمه کارستی سبزاب، یکی از بزرگترین چشمه‌های کارستی استان خوزستان را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که این چشمه دارای رژیم جریان مجرای می‌باشد و از ذخیره قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. همچنین رژیم تغذیه چشمه، دارای رژیم برفی- بارانی و از لحاظ رخداد یا عدم رخداد بارندگی، شامل سه رژیم قبل از بارندگی، بارندگی و بعد از بارندگی می‌باشد. تجزیه و تحلیل منحنی‌های فروکش چشمه، همراه با بررسی بیلان اجمالی منابع تغذیه‌کننده آن نشان می‌دهند که بخش اعظم آب چشمه از تاقدیس‌های مجاور و مقداری از آب دریاچه پشت سد کارون یک تأمین می‌گردد.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

مطالعات انجام شده در این پژوهش به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران به شرح زیر صورت گرفته است.

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

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

۳- نمونه‌برداری ماهیانه از چشمه کارستی ورسخواران از خرداد ماه ۱۳۹۴ تا آبان ماه ۱۳۹۵ و انتقال نمونه 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 برخی نمونه‌ها به آزمایشگاه‌های معتبر در کشورهای (آلمان و سوئیس)

۵- تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران

۶- ترسیم و محاسبه مساحت حوضه آبریز احتمالی چشمه کارستی ورسخواران در ادامه مراحل مطرح شده در بالا به طور مختصر توضیح داده می‌شود.

۱-۳- جمع آوری اطلاعات و مروری بر مطالعات پیشین

همان‌طور که در بخش قبل مطرح گردید سعی بر این شد تا با جمع آوری داده و بررسی مطالعات انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه، مطالعات مشابه در سایر نقاط و همچنین تهیه نقشه‌های 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 چشمه کارستی ورسخواران اطلاعات زیر جمع آوری شد:

— جمع‌آوری آمار بارش و دمای مربوط به شهرستانهای دماوند و فیروزکوه از سازمان آب منطقه‌ای استان تهران و در ادامه انتخاب ایستگاه‌های فیروزکوه، نجف‌در، علی‌آباد دوشستان، کهنک و نمرود که در نزدیک محدود مورد مطالعه قرار گرفته بودند به منظور ترسیم نمودار بارش و ارتفاع منطقه

— مراجعه به سایت USGS و دریافت مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی سی متر و ترسیم نقشه هیپسومتری و تخمین ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه کارستی ورسخواران

— مراجعه به سازمان زمین‌شناسی و دریافت نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تهران، ۱:۱۰۰۰۰۰ دماوند و ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان به منظور ترسیم نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

۳-۲- بازدیدهای صحرایی و زمین‌شناسی از حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران

منطقه مورد مطالعه بین دو شهرستان فیروزکوه و دماوند واقع شده است، بخش جنوب شرقی منطقه در نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان و بخش شمال غربی آن در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دماوند قرار داد پس از چند دوره بازدید صحرایی از منطقه و بررسی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان و ۱:۱۰۰۰۰۰ دماوند، نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در محیط GIS ترسیم گردید.

همچنین بازدیدهای صحرایی به منظور بررسی ژئومورفولوژی کارست، زمین‌شناسی، تعیین توالی چینه‌شناسی و حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران انجام گرفته است. همزمان با این بررسی‌ها نقش چین‌خوردگی‌ها و شکستگی‌های اصلی شامل گسل‌ها نیز به دقت بررسی گردید. در بررسی‌های ژئومورفولوژی کارست نیز سعی شد تا با ارزیابی درصد پوشش خاک، توسعه فضاهای انحلالی و سایر عوارض کارستی درصد تغذیه سالیانه در محدوده مورد نظر برآورد گردد و توسعه کارست در محدوده حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران بررسی شود.

۳-۳- نمونه‌برداری ماهیانه از چشمه ورسخواران

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به صورت ماهانه از چشمه کارستی ورسخواران از خردادماه ۱۳۹۴ تا آذرماه ۱۳۹۵ نمونه‌برداری به عمل آمد است. برخی پارامترها در مظهر چشمه و برخی دیگر پس از انتقال در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌اند.

۱-۳-۳- نمونه برداری از منابع آب

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

نمونه برداری از چشمه کارستی ورسخواران در طول سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ بر اساس روش‌های استاندارد انجام گرفت، است. موقعیت محل نمونه برداری که مظهر چشمه کارستی ورسخواران می‌باشد در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

۲-۳-۳- نمونه برداری هیدروشیمیایی از منابع آب

جهت نمونه برداری از منابع آبی مذکور از ظروف پلی‌اتیلنی ۵۰۰ سی‌سی استفاده شد. در طول دوره نمونه برداری سعی گردید از روش‌های استاندارد نمونه برداری استفاده شود. قبل از نمونه برداری نیز ظروف پلی‌اتیلنی چندین بار با آب چشمه شستشو داده شد. علاوه بر آن سعی شد در هر بار نمونه‌گیری از چشمه دو نمونه از آب چشمه برداشته شود تا در صورت گم شدن و یا از بین رفتن یکی از آن‌ها 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 نمونه برداری انجام شده‌اند.

برخی از پارامترها کمی شامل آبدهی، درجه حرارت و برخی پارامترهای شیمیایی شامل هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) در محل نمونه برداری اندازه‌گیری شده‌اند.

۳-۳-۳- 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 جریان (A) اندازه‌گیری شود، مقدار دبی (Q) را می‌توان از معادله زیر محاسبه نمود.

$$Q = A \cdot v \quad \text{معادله (۱-۳)}$$

در این پژوهش برای اندازه‌گیری دبی آب چشمه ورسخواران از دستگاه مولینه (سرعت سنج) ساخت شرکت آذر آشنا استفاده شده است. فرمول محاسبه سرعت برای این مولینه به صورت ذیل می‌باشد.

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

(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 چشمه ورسخواران در طی یک سال آبی و به صورت ماهانه به وسیله دستگاه مولینه اندازه‌گیری شده است.

۳-۳-۴- اندازه‌گیری درجه حرارت

یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی در مطالعات چشمه‌های کارستی درجه حرارت می‌باشد. اندازه‌گیری دما باید در محل نمونه‌برداری و به صورت سریع انجام شود. برای اندازه‌گیری این پارامتر از دماسنج شیشه‌ای با دقت یکدهم درجه سانتی‌گراد استفاده گردید.

۳-۳-۵- 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 هدایت الکتریکی برابر با یک میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد.

۳-۳-۶- اندازه‌گیری pH

از دیگر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل نمونه‌برداری 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 pH 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 مؤثر می‌باشد. به همین علت pH آب چشمه در محل به‌وسیله دستگاه pH متر سانتکس (Suntex) مدل Sp-701 اندازه‌گیری شده است. دقت این دستگاه برای اندازه‌گیری pH برابر با یکصدم واحد می‌باشد. با توجه به تغییرات اندک این پارامتر در طی فصول، این پارامتر تنها برای برخی از نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است.

۳-۴- اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های برداشت از چشمه و رسخواران به صورت ماهیانه جهت آنالیز عناصر اصلی (کاتیونها و آنیونها) به آزمایشگاه آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود و آزمایشگاه فریه دانشگاه برلین (Freie universitat Berlin) منتقل شدند. آنالیز نمونه‌های کربنات، بی‌کربنات، منیزیم، کلسیم و کلر از طریق تیتراسیون (Titration) و آنالیز یون‌های سدیم، پتاسیم و سولفات توسط دستگاه‌های کانسورت و هانا (Hanna and Consort) صورت گرفت.

۳-۴-۱- اندازه‌گیری آنیونها

غلظت یون کلر از طریق تیترسنجی با نیترات نقره ۰/۱ نرمال و شناساگر کرومات پتاسیم ۵ درصد انجام گردید. غلظت یون بی‌کربنات نیز به روش تیترسنجی با اسید سولفوریک استاندارد ۰/۵ نرمال و شناساگر متیل اورانژ اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری یون سولفات از دستگاه Hanna مدل HI 93751 استفاده شد. بدین صورت که پس از آماده‌سازی نمونه‌ها اقدام به اضافه نمودن پودر باریت (gr ۰/۱۴۳) 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.

۲-۴-۳- اندازه‌گیری کاتیون‌ها

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 (هیدروکسید پتاسیم) 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. سپس با قرار دادن پروپ مخصوص غلظت هر یون اندازه‌گیری شد.

۳-۴-۳- 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.

$$Error\% = \frac{\sum cation - \sum anion}{\frac{\sum cation + \sum anion}{2}} \times 100 \quad \text{معادله (۳-۳)}$$

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

۴-۴-۳- سختی کل (Total Hardness)

به منظور محاسبه سختی کل نمونه‌ها آب چشمه و رسخواران از معادله (۳-۶) استفاده شده است.

$$H = 2.5[Ca^{+2}] + 4.1[Mg^{+2}] \quad \text{معادله (۳-۴)}$$

در این معادله (H) سختی کل بر حسب میلی گرم در لیتر کربنات کلسیم معادل می باشد. غلظت منیزیم و کلسیم بر حسب میلی گرم در لیتر در رابطه وارد می شود.

۳-۴-۵- کل مواد محلول

جهت محاسبه کل جامدات محلول در آب زیرزمینی از رابطه (۳-۵) استفاده می شود.

$$TDS = \sum Ions \quad \text{معادله (۳-۵)}$$

در این رابطه (TDS) کل جامدات محلول در آب بر حسب میلی گرم بر لیتر و $\sum Ions$ مجموع یونها در نمونه آب بر حسب میلی گرم در لیتر می باشد.

۳-۴-۶- محاسبه ضرایب اشباع (کلسیت، دولومیت، هالیت)

اندیس های اشباع کلسیت، دولومیت و هالیت سه پارامتر مهم در تفسیر شرایط هیدروشیمیایی آبهای چشمه ای کارستی و دیگر منابع آبی می باشند. محاسبه این پارامترها توسط نرم افزار Phree qc 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 می باشد.

۳-۵- محاسبات ضرایب آماری

به طور کلی در این مطالعه جهت بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه ورسخواران از جامعه آماری (تغییرات خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه) استفاده شد است. از آن جهت که توان بررسی کل جامعه آماری (تغییرات در هر لحظه) میسر نبود از جامعه آماری به صورت تصادفی نمونه گیری به عمل آمد و همچنین جهت تجزیه و تحلیل جامعه های آماری از یکسری پارامترهای آماری میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و ضریب همبستگی استفاده شده است.

۳-۶- تعیین محدوده حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران

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 چشمه کارستی ورسخواران به صورت مقدماتی ترسیم گردید و مساحت آن محاسبه شد. برای حوضه آبرگیر مشخص شده، مقادیر بارش سالیانه از روش نمودار ارتفاع بارش ایستگاه‌های مجاور تعیین گردید. همچنین با توجه به بازدیدهای 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 (۳-۶) به دست آمد. علاوه بر این، حجم تخلیه سالیانه از طریق هیدروگراف سالیانه چشمه نیز محاسبه شد. در انتها با مقایسه مقادیر حجم تغذیه و تخلیه سالیانه دقت ترسیم حوضه مقدماتی بررسی و در صورت نیاز تصحیصاتی روی آن اعمال گردید.

$$A = \frac{V}{PR} \quad \text{معادله (۳-۶)}$$

در این رابطه P میانگین سالیانه بارش در حوضه آبرگیر چشمه با واحد متر، R درصد نفوذ بارندگی بدون واحد، A مساحت حوضه آبرگیر با واحد مترمربع و در نهایت V میانگین تغذیه سالیانه چشمه با واحد مترمکعب می‌باشد.

فصل چہارم
بررسی خصوصیات ہیدروژنولوژیکی و
ہیدروژنوشیمیائی
چشمہ کارستی و رسخواران

خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی در آبخوانهای کارستی توسط ترکیب شیمیایی سنگ‌های آبخوان و فاکتورهای موثر بر جریان تعیین می‌شوند (Moral, 2008). در برخی آبخوان‌ها کارستی، که زهکشی از طریق چشمه‌ها صورت می‌گیرد شناخت خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی، مستلزم مطالعه دقیق تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب چشمه‌ها می‌باشد.

همانطور که در فصل اول ذکر گردید، چشمه کارستی ورسخواران با متوسط آبدهی حدود ۱/۴ مترمکعب بر ثانیه یکی از مهم‌ترین چشمه‌های کارستی شهرستان فیروزکوه است، آبخوان این چشمه را لایه‌های کربناته دلیچای، لار و کرتاسه فوقانی تشکیل می‌دهند و با توجه به ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه بیشتر آب آن از طریق چشمه کارستی ورسخواران تخلیه می‌شود. بنابراین، اهداف اصلی در این فصل را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- ارزیابی ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبخیز چشمه ورسخواران

- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی آب چشمه ورسخواران

- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب چشمه ورسخواران

- تعیین حوضه آبخیز چشمه ورسخواران

به همین جهت در این فصل ابتدا عوارض مورفولوژی کارست در حوضه آبخیز مورد ارزیابی قرار گرفته و در ادامه خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آب چشمه کارستی ورسخواران مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و در انتها با توجه به اطلاعات به دست آمده حوضه آبخیز چشمه ترسیم و صحت تعیین حوضه آبخیز بررسی و مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- ارزیابی ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبخیز چشمه ورسخواران

مهمترین نتیجه فرایند انحلال بر سنگ‌های کربناته ایجاد مورفولوژی خاص است که سیمای این مناطق را از نواحی دیگر کاملاً متمایز می‌سازد. با وجود اهمیت اشکال سطحی در پیش بینی توسعه زیر سطحی کارست، بی‌گمان عدم وجود و گسترش عوارض مورفولوژی دلیلی بر عدم توسعه زیر سطحی کارست نمی‌باشد. از آنجایی که اشکال کارستی و تکامل تدریجی آنها نتیجه مستقیم عمل انحلال آب در

محیط‌های کربناته انحلال پذیر می‌باشد، لذا درک کامل مورفولوژی آنها پیش نیاز برای حل یک سری از مسائل هیدروژئولوژیکی در منطقه می‌باشد.

همان طور که در فصل اول به آن اشاره گردید در منطقه مورد مطالعه، سازندهای آهکی لار و کرتاسه فوقانی از عمده‌ترین سازندهای کربناته می‌باشند که در یال ناودیسی قره‌داغ رخنمون یافته‌اند. بخش-هایی از منطقه مورد مطالعه را سنگ‌های برهنه فاقد اپی کارست (Epikarst) تشکیل می‌دهند (ارتفاع ۲۵۰۰ متری و بالاتر از آن) 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 حوضه آبگیر چشمه ورسخواران اشکال مورفولوژی کارست از جمله کارن، گودی مسدود، فروچاله‌های کوچک مقیاس و عوارض هیدروژئولوژیکی مانند چشمه گسترش یافته‌اند. در ادامه پدیده‌های ژئومورفولوژی مشاهده شده در سازندهای آهکی مذکور مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱-۱-۴- کارن‌ها

کارن (Karren) یا لایپه (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 گفته می‌شود. 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 کوه قره‌داغ به طور فراوان دیده می‌شوند. هر جا که سازند آهکی لار و کرتاسه رخنمون دارد می‌توان به وفور این اشکال را در سنگ‌های برهنه مشاهده نمود. نمونه‌هایی از کارن‌ها در لایه‌های آهکی کرتاسه فوقانی در شکل‌های (۱-۴) و (۲-۴) نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۱- نمایی از کارن‌های پیچ و خم دار (راست) و شیاری (چپ) در سنگ‌های کارستی حوضه آبگیر چشمه ورسخواران



شکل ۴-۲- نمایی از کارن‌های عمیق در حوضه آبگیر چشمه کارستی ورسخواران

به عبارتی کارن‌ها شکل‌های ویژه از کارست هستند که بهترین نشانه برای فرایند کارستی شدن می‌باشند از عوامل موثر در توسعه کارن‌ها عوامل ساختاری نظیر درزه‌ها، صفحات لایه بندی 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 پرشیب کارن‌ها از نوع شیاری بوده و در نواحی کم شیب از نوع کندوئی و حفره‌ای هستند. معمولاً کارن‌ها در آهک‌های خالص و توده‌ای مشاهده شده و در آهک‌های مارنی، شیلی دیده نمی‌شوند. بهترین توسعه کارن‌ها در سنگ آهک‌های توده‌ای، خالص و با لایه بندی ضخیم است.

۲-۱-۴- دره‌های خشک

یکی از مشخصه‌های اصلی ارتفاعات بالا در حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران 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 صحرائی صورت گرفته از منطقه مورد مطالعه مشاهده شد که، دره‌های خشک، و کارن‌ها از جمله عوارضی هستند که در حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران گسترش زیادی داشته و در بخش‌هایی از محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شوند. شکل (۳-۴) نمایی از یک دره خشک در ارتفاعات قره‌داغ را نمایش می‌دهد.

۳-۱-۴- گودی مسدود

گودی مسدود (Close depression) را می‌توان یک عارضه کارستی در نظر گرفت که از اطراف گودتر باشد و در اثر پدیده انحلال در طی سالیان متمادی تشکیل شده باشد. در سیستم گودی‌های مسدود، آبی که وارد محدوده می‌شود راه خروجی ندارد و معمولاً توسط یک یا چند پانر (Ponor) و فروچاله عمل زهکشی زیرزمینی صورت می‌گیرد. در منطقه مورد مطالعه این عارضه کارستی فقط در محدوده‌ای به مساحت ۲/۲ کیلومتر مربع در ارتفاع ۲۸۰۰ متری به صورت متراکم در شرق کوه قره‌داغ قابل شناسایی می‌باشند. شکل (۴-۴) گودی‌های مسدود در کوه قره‌داغ که در نرم افزار Google Earth مشخص شده‌اند را نمایش می‌دهد.

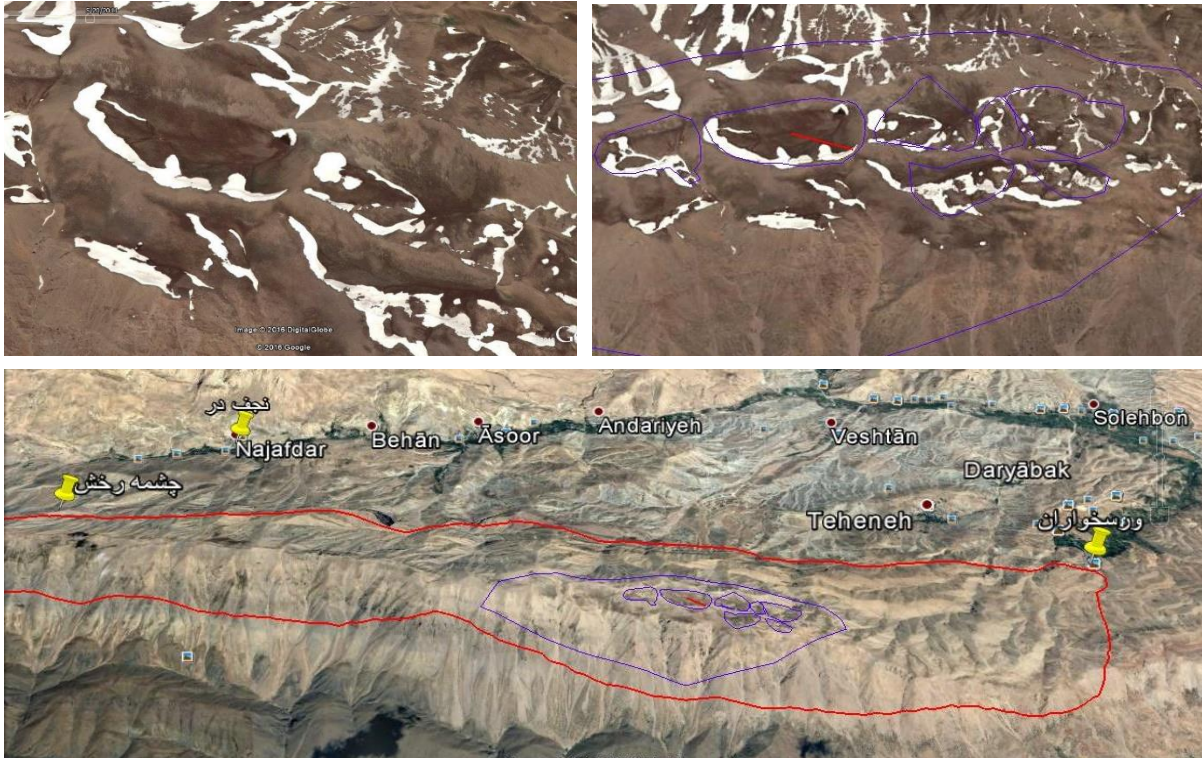


شکل ۳-۴- نمایی از یک دره خشک کارستی در جنوب حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران

۴-۱-۴- فروچاله‌ها

فروچاله‌ها (Sinkholes) از عوارض اصلی در مناطق کارستی هستند که حضور این عوارض در مناطق کارستی نشان دهنده توسعه یافتگی کارست در آن منطقه می‌باشد. آنها کم و بیش به صورت دایره‌های گود و بسته هستند که، ظاهر و اندازه مختلفی دارند. انحلال و ریزش دو مکانیسم اصلی تشکیل دهنده این عوارض می‌باشند. آنها نقاطی در مناطق کارستی هستند که گاهی اوقات در تراکم انبوه در مناطق کارستی مشاهده می‌شوند. شکل فروچاله‌ها و نحوه تشکیل آنها در بیشتر موارد به وسیله زمین‌ساخت مشخص می‌شود. با توجه به اینکه دولین‌ها اغلب در نزدیکی گسل‌ها تشکیل می‌شوند، بنابراین محور طولی آنها به طور معمول در جهت شکستگی‌های اصلی زمین‌ساختی منطقه می‌باشد. به نظر میلانویچ (Milanovic, 1981) مشاهده حفره‌های فروکش در شیب‌های تند غیره متداول بوده ولی چنانچه یافت شوند حاصل فروکش کردن سقف‌های مغاره‌ها می‌باشند.

پس از بازدیدهای صحرائی مشخص شد که فروچاله‌ها تنها در بخش محدودی از ارتفاعات مشاهده می‌شوند. شکل (۴-۵) فروچاله‌های مشخص شده در حوضه آبخیز چشمه کارستی ورسخواران را نشان



شکل ۴-۴- فروچاله‌های مشخص شده در ارتفاعات قره‌داغ (قطر نقاط مشخص شده حدوداً از ۱۰۰ متر تا ۴۰۰ متر متغیر می‌باشد) می‌دهد.

۴-۱-۵- 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 صحرائی از منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد که سنگ برهنه، با توجه به ارتفاع و جنس لایه‌ها آهکی در منطقه توسعه پیدا کرده است به این صورت که در شیب‌های توپوگرافی زیاد و ارتفاع ۳۰۰۰ متری به بالا اپی کارست (Epikarst) بر روی سطوح سنگی مشاهده نمی‌شود ولی در ارتفاع ۲۵۰۰ تا ۲۷۰۰ متری اپی کارست با ضخامت اندک بر روی سطوح مشاهده می‌شود (شکل ۴-۵). بر روی

سنگ‌های برهنه منطقه می‌توان آثار انحلالی نظیر کارن‌ها، فضا‌های انحلالی را مشاهده نمود که باعث افزایش تغذیه از سطح توده کارستی گردیده است.



شکل ۴-۵- نمایی از اپی کارست کم ضخامت در لایه‌های آهکی ارتفاعات قره‌داغ

۶-۱-۴- حفرات انحلالی

از مهم‌ترین عارضه‌هایی که در مناطق کارستی ایجاد می‌شوند حفرات و شکاف‌های انحلالی هستند. تشکیل حفرات انحلالی در نواحی کارستی در ارتباط با ترکیب شیمیایی سنگ آهک و وجود درزه‌های ریز می‌باشد. آب از طریق درزه‌های ریز وارد توده سنگی شده و بخش‌های با حلالیت بالا را از توده سنگ خارج می‌نماید (Ford and Williams, 2007). شکل (۴-۶) حفرات انحلالی در سازند آهکی کرتاسه فوقانی را به تصویر کشیده است.

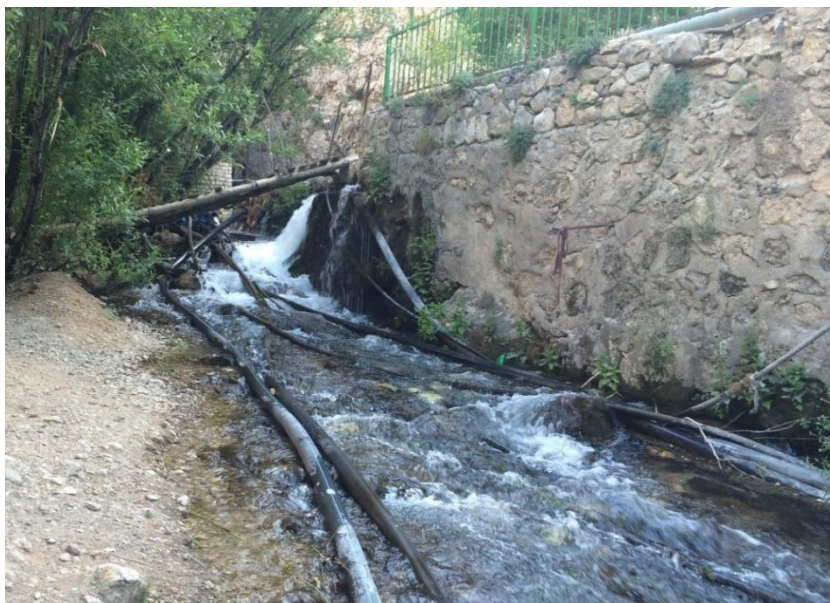


شکل ۴-۶- نمایی از فضاهاى انحلالی در لایه‌های آهکی نزدیک مظهر چشمه کارستی ورسخواران

۴-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه ورسخواران

به ظهور طبیعی و متمرکز آب‌های زیرزمینی در سطح زمین، چشمه می‌گویند یکی از مهمترین عوارض هیدروژئولوژیکی مناطق کارستی، چشمه‌های کارستی می‌باشند. در منطقه مورد مطالعه، چشمه کارستی ورسخواران در اثر عملکرد یکی از شاخه‌های فرعی گسل مشا- فشم، که یال ناودیس قره‌داغ را قطع کرده است، ظاهر شده است. در کوه قره‌داغ چشمه ورسخواران با متوسط آبدهی حدود ۱/۴ مترمکعب بر ثانیه پر آب ترین چشمه منطقه محسوب می‌شود. شکل (۴-۷) نمایی از چشمه کارستی ورسخواران را نمایش می‌دهد.

همان طور که اشاره شد در این مطالعه به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی از یک سری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب چشمه که در طول سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ اندازه‌گیری شده‌اند استفاده شد است. در فاصله زمان ذکر شده، ۱۷ بار از چشمه کارستی ورسخواران نمونه‌برداری شد که از نمونه‌ها برداشته شده ۷ نمونه برای تعیین غلظت یون‌ها اصلی به آزمایشگاه فرستاده شده‌اند. جدول (۴-۱) مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه کارستی ورسخواران را نشان می‌دهد. در این قسمت از دو پارامتر فیزیکی مهم (آبدهی، درجه حرارت آب) به منظور تفسیر و تحلیل خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان چشمه ورسخواران استفاده شده است.



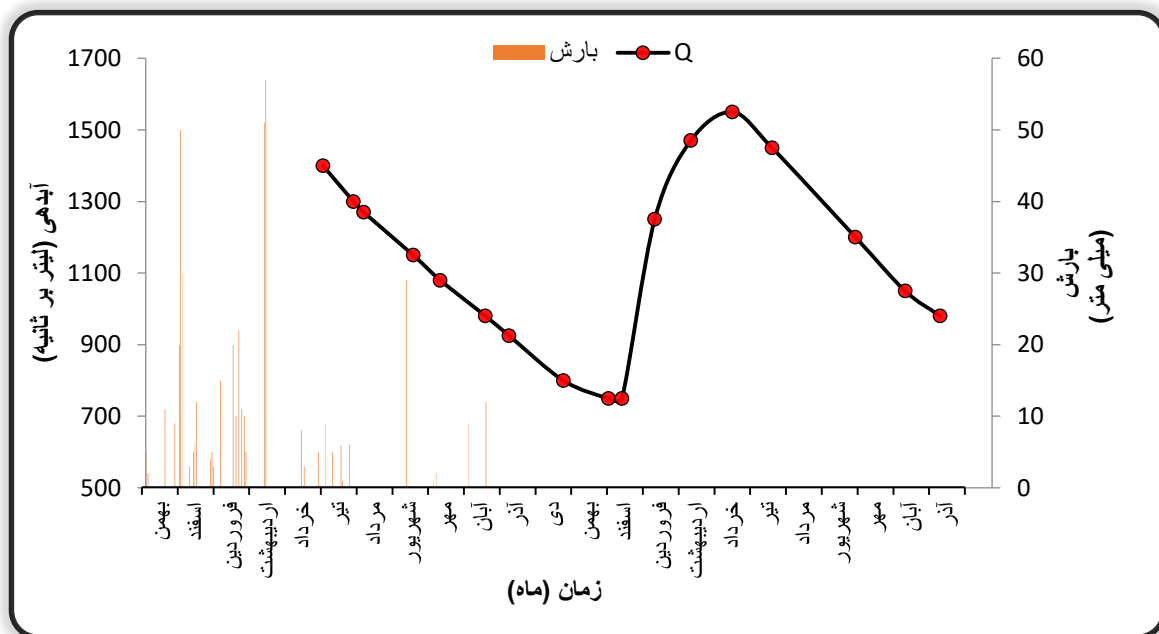
شکل ۴-۷- نمایی از چشمه کارستی ورسخواران

جدول ۴-۱- پارامترهای اندازه‌گیری شده در مظهر چشمه کارستی ورسخواران (از خرداد ۱۳۹۴ تا آذرماه ۱۳۹۵)

| درجه حرارت آب (°C) | pH | هدایت الکتریکی ($\mu\text{mhos/cm}$) | دبی چشمه (lit/sec) | تاریخ نمونه‌برداری |
|-----------------------|-----|---|-----------------------|--------------------|
| - | - | ۲۸۰ | ۱۴۰۰ | ۹۴/۰۳/۲۸ |
| ۷/۵ | - | ۳۰۱ | ۱۳۰۰ | ۹۴/۰۴/۲۴ |
| ۷/۵ | - | ۲۹۷ | ۱۲۷۰ | ۹۴/۰۵/۰۲ |
| - | - | ۲۹۲ | ۱۱۵۰ | ۹۴/۰۶/۱۵ |
| ۱۰ | ۷/۶ | ۲۹۶ | ۱۰۸۰ | ۹۴/۰۷/۰۸ |
| ۹/۲ | ۷/۶ | ۲۹۰ | ۹۸۰ | ۹۴/۰۸/۱۸ |
| - | ۷/۸ | ۲۸۰ | ۹۲۵ | ۹۴/۰۹/۰۹ |
| ۹/۱ | - | ۲۷۰ | ۸۰۰ | ۹۴/۱۰/۲۷ |
| ۹/۲ | ۷/۷ | ۲۶۷ | ۷۵۰ | ۹۴/۱۲/۰۷ |
| ۹/۵ | - | ۲۶۰ | ۷۵۰ | ۹۴/۱۲/۱۹ |
| ۱۰ | ۷/۷ | ۲۵۶ | ۱۲۵۰ | ۹۵/۰۱/۱۸ |
| ۸/۵ | ۷/۷ | ۲۷۰ | ۱۴۷۰ | ۹۵/۰۲/۱۹ |
| ۹ | ۷/۶ | ۲۹۸ | ۱۵۵۰ | ۹۵/۰۳/۲۵ |
| ۷/۸ | - | ۲۷۶ | ۱۴۵۰ | ۹۵/۰۴/۲۹ |
| ۹ | ۷/۵ | ۲۸۵ | ۱۲۰۰ | ۹۵/۰۷/۱۰ |
| - | - | - | ۱۰۵۰ | ۹۵/۰۸/۲۳ |
| - | - | - | ۹۸۰ | ۹۵/۰۹/۲۴ |
| ۰/۹ | ۰/۱ | ۱۴ | ۲۵۳ | انحراف معیار |
| ۸/۹ | ۷/۷ | ۲۸۱ | ۱۱۳۸ | میانگین |
| ۹/۸ | ۱/۴ | ۵ | ۲۲ | ضریب تغییرات (%) |

۱-۲-۴- تغییرات زمانی آبدهی چشمه کارستی ورسخواران

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. شکل (۸-۴) هیدروگراف چشمه ورسخواران را که بر اساس داده‌های آبدهی جدول (۴-۱) و داده‌های بارش ایستگاه نجفدر ترسیم شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸- هیدروگراف چشمه کارستی ورسخواران برای سال آبی ۹۴-۹۵

همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود میزان آبدهی از ۷۵۰ لیتر در ثانیه در اواخر اسفند ماه تا ۱۵۵۰ لیتر در ثانیه در اواخر خردادماه ۱۳۹۵ تغییر می‌کند از آنجایی که حداکثر تخلیه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان و فیزیوگرافی حوضه آبگیر بستگی دارد و برای هر چشمه منحصر به فرد می‌باشد. مشاهده می‌شود، که شاخه صعودی (Rising limb) نمودار آبدهی چشمه از اواخر اسفند شروع شده و در اواخر خردادماه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین در شکل ملاحظه می‌شود که شاخه فروکش (Falling limb) نمودار آبدهی از اواخر خرداد تا اواخر اسفندماه ادامه می‌یابد. از آنجایی که به

دلیل کشیدگی حوضه آبخیز همه مجاری فرعی انتقال دهنده جریان در آبخوان چشمه کارستی ورسخواران در یک زمان به مسیر اصلی تخلیه نمی‌شوند آبدهی چشمه با یک روند منظمی کاهش می‌یابد.

از دیگر کاربردهای ثبت تغییرات آبدهی چشمه‌های کارستی، تعیین ارتباط بین تخلیه (آبدهی) و تغذیه (بارش) می‌باشد. از آنجایی که بارندگی‌های اسفند تا دی‌ماه به صورت برف می‌باشند، دبی چشمه به طور تدریجی از اواخر خرداد تا اواخر اسفندماه کاهش می‌یابد. در ادامه با ذوب شدن برف فصل زمستان و همراه شدن آن با بارندگی‌های اردیبهشت‌ماه دبی چشمه افزایش یافته و در اواخر خردادماه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. فیزیوگرافی حوضه و در راس آن کشیدگی آبخوان و وجود لایه‌هایی با تراوایی اندک (سازند دلیچای) عواملی هستند که زمان تمرکز آب در آبخوان و زمان بیشینه آبدهی را کنترل می‌کنند. همچنین با توجه به نتایج مندرج در جدول (۱-۴) مشاهده می‌شود که میزان ضریب تغییرات آبدهی این چشمه چندان بالا نبوده و برابر با $22/3$ درصد است. با مقایسه ضریب تغییرات آبدهی چشمه ورسخواران با ضریب تغییرات دیگر چشمه‌های کارستی و همچنین نتایج کارهای جاکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir, 1974) 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 حوضه و ارزیابی عوارض کارستی در حوضه آبخیز، ضریب تغییرات حاصله بیانگر سیستم غالب جریان مجرای-افشان در آبخوان چشمه می‌باشد.

۲-۲-۴- ارزیابی و تحلیل ضریب و منحنی فرود چشمه کارستی ورسخواران

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 در بردارنده چشمه کارستی ورسخواران و در راس آن ارزیابی خصوصیات ساختاری آبخوان و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان استفاده شد است.

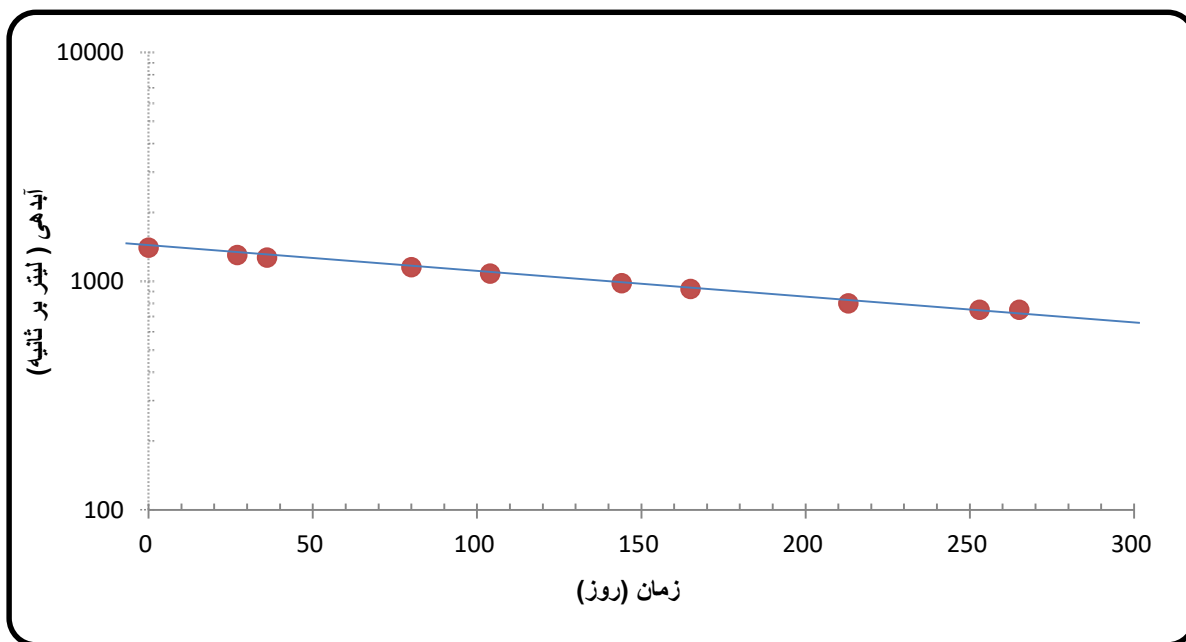
بر اساس هیدروگراف چشمه کارستی ورسخواران و با شناسایی ابتدا و انتهای دوره فروکش (Recession)، منحنی فرود یا منحنی تقلیل (Recession curve or depletion curve) چشمه ترسیم

گردید

است.

شکل

(۴-۹) منحنی فرود چشمه ورسخواران را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که منحنی فرود چشمه دارای یک شیب می‌باشد. عمدتاً تخلیه در قسمت‌های اولیه منحنی فرود تحت تاثیر مجاری با جریان متلاطم که دارای قابلیت انتقال بالا و ذخیره پایین می‌باشند، انجام می‌شود. عموماً جریان متلاطم تنها قسمت‌های اولیه منحنی فروکش را تحت تاثیر قرار می‌دهند و تاثیرات آنها با تخلیه چشمه کاهش می‌یابد. آب قسمت‌های بعدی منحنی فرود چشمه، عمدتاً تحت تاثیر خلل و فرج کوچکتر از یک میلی‌متر با جریان آرام که دارای قابلیت انتقال اندک ولی ذخیره‌سازی نسبتاً بالا می‌باشد تامین می‌شود. از عوامل موثر بر منحنی فرود چشمه می‌توان به باقی ماندن برف در انتهای حوضه تا زمان طولانی، وجود سازندهایی با تراوایی اندک (سازند دلیچای) و همچنین به کشیدگی حوضه آبگیر چشمه اشاره نمود.



شکل ۴-۹- منحنی فرود چشمه کارستی ورسخواران در سال آبی ۹۴

به منظور محاسبه ضریب فرود چشمه ورسخواران از معادله (۱)، که اختصاص بر پایه مطالعات مایلت و بوسینگ (Maillet, 1905, Boussinesq, 1903 and 1904) دارد استفاده شده است. این محققین با فرض بر این که تخلیه چشمه، تابعی از حجم آب ذخیره شده در مخزن است (جریان ورودی عملاً صفر است) آن را به شکل معادله نمایی نشان دادند (Ford and Williams, 2007).

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

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) به صورت زیر می‌باشد.

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

ضریب فروکش میزان توانایی آبخوان در ذخیره سازی آب را نشان می‌دهد و تابع تخلخل موثر، قابلیت انتقال، شکل حوضه آبرگیر، وضعیت سطح پتانسیومتری و تغذیه از آبخوانهای دیگر می‌باشد. براساس 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. برعکس وقتی که ضریب α زیاد باشد، منحنی فرود دارای شیب تند بوده و ذخایر دینامیکی در این حالت موقتی بوده و خیلی سریع تخلیه می‌شود به طور کلی، هنگامی که ضریب فروکش در مرتبه 10^{-2} قرار داشته باشد، نشان دهنده‌ی زهکشی سریع شکستگیها و مجاری کارستی می‌باشد و هنگامیکه این ضریب کوچکتر باشد (مرتبه 10^{-3}) نشان دهنده تخلیه حفرات و دزره و شکستگی‌های ریز می‌باشد به طور کلی بهتر است تحلیل‌ها ضرایب فروکش همراه با در نظر گرفتن شرایط فیزیوگرافی حوضه آبرگیر (شکل و شیب حوضه آبرگیر) 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 کوچکتری و در حوضه‌های گرد و با تراوایی بالا عکس این حالت را ایجاد نماید.

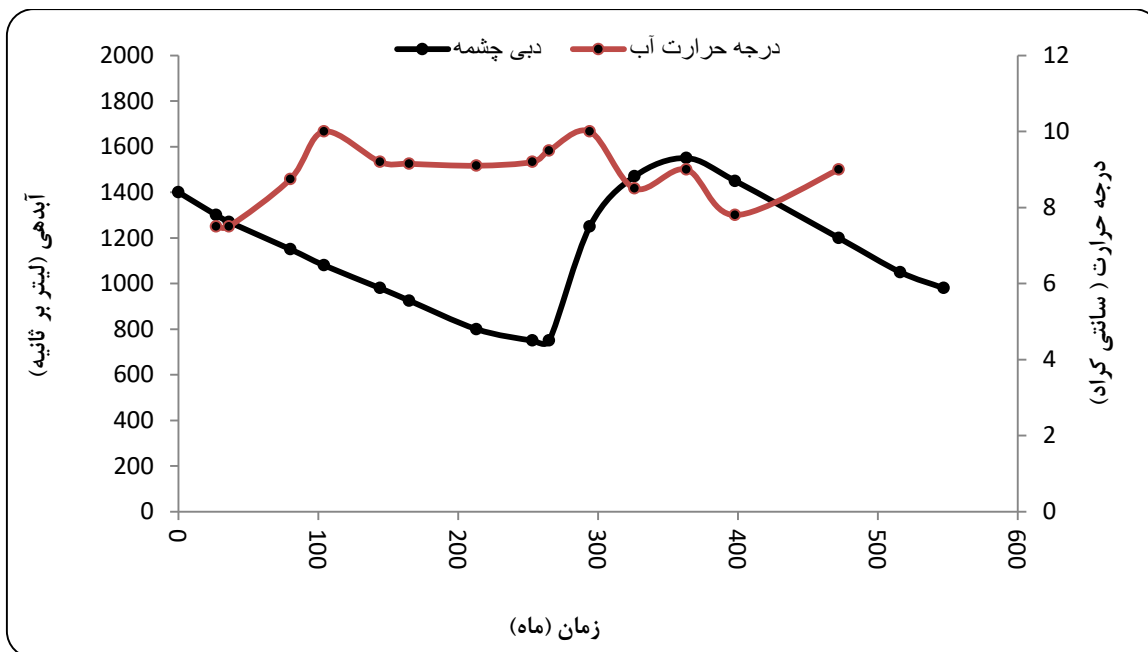
بر اساس محاسبات انجام شده، ضریب فرود چشمه کارستی ورسخواران در طول فروکش ۲۶۵ روزه حدوداً برابر با ۰/۰۰۳ می‌باشد و از عوامل موثر بر آن می‌توان همان دلایل قبلی را که برای منحنی فرود گفته شد را مطرح نمود.

۳-۲-۴- تغییرات زمانی درجه حرارت در چشمه کارستی ورسخواران

ضریب تغییرات درجه حرارت و ارتباط آن با آبدهی یک معیارهای مهم در مطالعات هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها کارستی می‌باشد که از این پارامتر می‌توان برای تفکیک جریان افشان و مجرای استفاده نمود. به طور کلی چشمه‌هایی با سیستم جریان افشان به دلیل سیستم تغذیه و زمان ماندگاری آب دارای

ضریب تغییرات کمتر از ۱/۴ می‌باشند (Jacobson and Langmuir, 1974). بر اساس محاسبات آماری درجه حرارت چشمه ورسخواران جدول (۱-۴)، میانگین درجه حرارت آب چشمه کارستی ورسخواران ۸/۹ درجه سانتی‌گراد و ضریب تغییرات آن ۹/۸ درصد می‌باشد. با توجه معیارهای پیشنهادی جاکوبسن و لانگموری (Jacobson and Langmuir, 1974)، و مقایسه ضریب تغییرات چشمه ورسخواران با آن و به دلیل ضریب تغییرات نسبتاً زیاد چشمه، سیستم جریان آن در رده سیستم جریان مجرای-افشان تشخیص داده شد. از عوامل موثر بر تغییرات درجه حرارت چشمه می‌توان به تغذیه نقطه‌ای از طریق فروچاله‌هایی که در شرق حوضه آبگیر واقع شده و در فاصله نزدیک نسبت به مظهر چشمه قرار گرفته‌اند و از طریق مجاری انحلالی بزرگ انتقال پیدا می‌کنند اشاره نمود.

به منظور تعیین ارتباط درجه حرارت با تغییرات آبدهی چشمه کارستی ورسخواران نمودار تغییرات آن با آبدهی ترسیم گردید شکل (۱۰-۴).



شکل ۴-۱۰- تغییرات زمانی درجه حرارت آب و دبی چشمه کارستی ورسخواران از خردادماه ۱۳۹۴ تا آذرماه

۱۳۹۵

با توجه به نمودار، مشاهده می‌شود که تغییرات درجه حرارت چشمه کارستی ورسخواران با تغییرات دبی جریان رابطه معکوسی دارد. مشاهده می‌شود که دبی جریان خروجی از خردادماه روند نزولی در پیش می‌گیرد، شیب هیدرولیکی کاهش و در نتیجه آن جریان سریع، کاهش یافته و در پی آن زمان

اقامت آب افزایش می‌یابد و دمای آب روند افزایشی پیدا می‌کند به طوری که دمای آن به دمای آبخوان نزدیک می‌شود. و در ادامه با رسیدن آبهای حاصل از ذوب برف که در اواخر اسفند ماه تغذیه شده‌اند و از طریق مجاری انحلالی بزرگ با سرعت زیاد انتقال یافته‌اند دما کاهش می‌یابد، رفته‌رفته با ذوب شدن برف فصل زمستان و همراه شدن آن با بارش‌های اردیبهشت ماه و به دلیل رانده شدن آب‌های قبلی موجود در ناحیه اشباع و مجاری کارستی که زمان ماندگاری زیاد داشته‌اند دما دوباره افزایش اندکی یافته و با از بین رفتن اثر آن دوباره روند کاهشی پیدا می‌کند.

۳-۴- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران

آب زیرزمینی در آبخوانهای مرتفع کارستی از آب‌های باران و برفی که به درون آن نفوذ کرده، به وجود می‌آیند. خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب‌های کارستی عموماً وابسته به انحلال کانی‌های کربناته شامل کلسیت، دولومیت، هالیت و آراگونیت می‌باشد. با افزایش زمان ماندگاری آب در آبخوان و در امتداد خطوط جریان از منطقه تغذیه به تخلیه شیمی آن توسط انواع گوناگونی از فرآیندهای ژئوشیمیایی تحت تاثیر 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 گیرد. در این قسمت تغییرات کمی آب (هیدروگراف) چشمه ورسخواران، با تغییرات هم‌زمان کیفی آن، به منظور تشخیص منشاء تغذیه، تشخیص رژیم جریان و کیفیت هیدروژئوشیمیایی آب چشمه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۱-۳-۴- تغییرات زمانی هدایت الکتریکی در چشمه کارستی ورسخواران

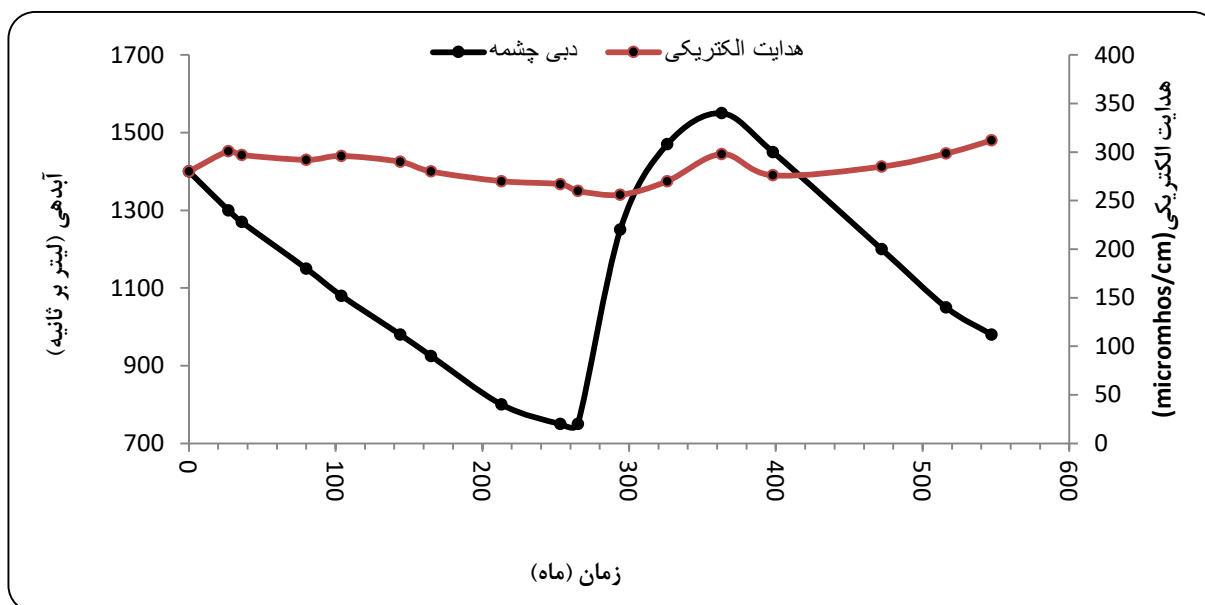
هدایت الکتریکی (EC) و روند تغییرات آن همواره نشان دهنده زمان ماندگاری آب در آبخوان و جنس آبخوان در بردارنده آن می‌باشد که اندازه آن به غلظت و نوع یون‌های محلول و دما بستگی دارد و با افزایش زمان ماندگاری غلظت یون‌های در بردارنده آب و در پی آن هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. هدایت الکتریکی نماینده‌ای از 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 جدول (۱-۴) مشاهده می‌شود که میزان ضریب تغییرات هدایت الکتریکی بسیار ناچیز است. به طور کلی تغییرات هدایت الکتریکی در بسیاری از چشمه‌ها کارستی، حتی، چشمه‌های کارستی که سیستم غالب جریان مجرای است، بسیار ناچیز است. برای مثال در چشمه سراب روانسر که سیستم کاملاً مجرای دارد تغییرات هدایت الکتریکی بسیار ناچیز است. پس این چنین می‌توان گفت که، ضریب تغییرات هدایت الکتریکی چشمه کارستی ورسخواران، بیانگر سیستم غالب جریان مجرای-افشان در آبخوان چشمه می‌باشد.

رابطه هدایت الکتریکی و آبدهی

به طور کلی در سیستم‌های کارستی تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به آبدهی 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 آبدهی 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 هدایت الکتریکی کاهش یافته و با کاهش آبدهی هدایت الکتریکی دوباره به حالت اولیه باز می‌گردد. با استفاده از اطلاعات مندرج در جدول (۱-۴) نمودار تغییرات هدایت الکتریکی و آبدهی چشمه ورسخواران برای سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ ترسیم شده است (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱۱- تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و دبی چشمه کارستی ورسخواران در سال آبی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۵

در نمودار نمایش داده شده به روشنی مشاهده می‌شود که یک تغییر ملایم در مقادیر هدایت الکتریکی وجود دارد با افزایش آبدهی، هدایت الکتریکی به دلیل جریان پیستونی در آبخوان و رانده شدن آب‌های قبلی با زمان ماندگاری بالا، روند افزایشی اندکی از خود نشان می‌دهد و پس از ناپدید شدن اثر آن کاهش می‌یابد. و در ادامه با کاهش آبدهی به دلیل تغییر رژیم آبدهی هدایت الکتریکی روند خود را حفظ نموده و می‌توان عنوان نمود که تا حد کمی روند ثابتی از خود نشان می‌دهد.

۲-۳-۴- تغییرات زمانی غلظت یونهای اصلی (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) در چشمه کارستی

ورسخواران

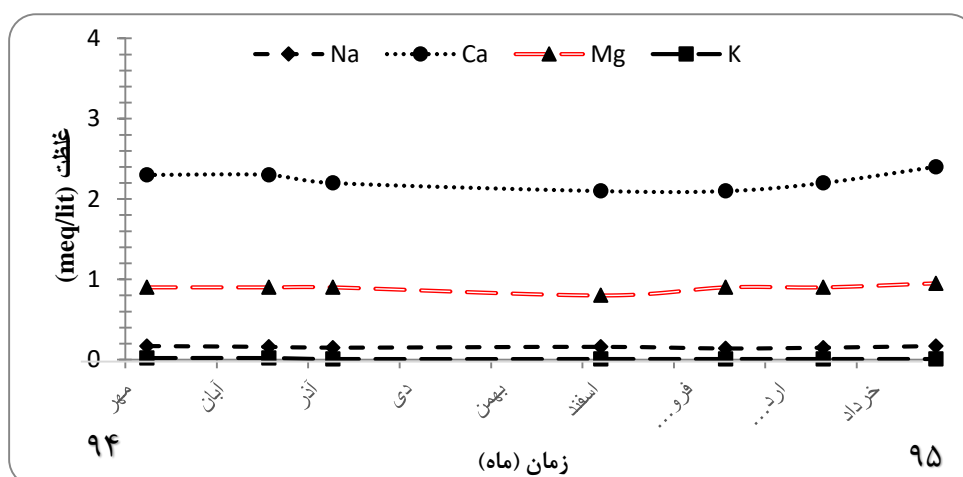
غلظت یون‌های محلول (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) در آبهای زیرزمینی به زمان ماندگاری آب در بخش‌های مختلف آبخوان، جنس آبخوان، نوع سیستم جریان و مسافتی که آب از محل تغذیه تا محل تخلیه طی می‌کند بستگی دارند. همانطور که قبلاً اشاره شد، در فاصله زمانی اردیبهشت ماه ۱۳۹۴ تا آذرماه ۱۳۹۵، ۱۷ بار از چشمه ورسخواران نمونه‌برداری شده است و سپس سه نمونه از فصل خشک و چهار نمونه از فصل تر، 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 جدول (۲-۴) ارائه شده است. با استفاده از نتایج مندرج در جدول مذکور، تغییرات زمانی آنیون‌های و کاتیون‌ها اصلی به ترتیب در

(۱۳-۴) ترسیم شده است.

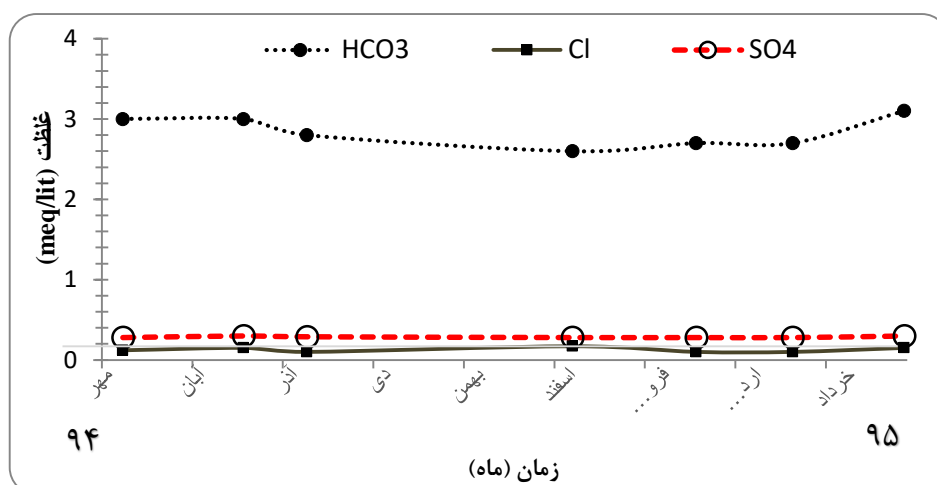
جدول ۲-۴- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی ورسخواران (بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر)

| خطای آزمایش (%) | غلظت کاتیون‌ها (meq/lit) | | | | غلظت آنیون‌ها (meq/lit) | | | تاریخ نمونه‌برداری |
|--------------------|--------------------------|-----------|--------|-------|-------------------------|--------|-------------|-----------------------|
| | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | K^+ | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{2-} | |
| ۱/۶ | ۲/۳ | ۰/۹ | ۰/۱۷ | ۰/۰۲ | ۳ | ۰/۱۲ | ۰/۲۸ | ۹۴/۰۷/۰۸ |
| ۱/۷ | ۲/۳ | ۰/۹ | ۰/۱۶ | ۰/۰۲ | ۳ | ۰/۱۵ | ۰/۳ | ۹۴/۰۸/۱۸ |
| ۲/۲ | ۲/۲ | ۰/۹ | ۰/۱۵ | ۰/۰۱ | ۲/۸ | ۰/۱ | ۰/۲۹ | ۹۴/۰۹/۰۹ |
| ۲/۸ | ۲/۱ | ۰/۸ | ۰/۱۶ | ۰/۰۱ | ۲/۶ | ۰/۱۷ | ۰/۲۸ | ۹۴/۱۲/۰۷ |
| ۲/۵ | ۲/۱ | ۰/۹ | ۰/۱۴ | ۰/۰۱ | ۲/۷ | ۰/۱ | ۰/۲۸ | ۹۵/۰۱/۱۸ |
| ۰/۹۶ | ۲/۲ | ۰/۹ | ۰/۱۵ | ۰/۰۱ | ۲/۷ | ۰/۱ | ۰/۲۸ | ۹۵/۰۲/۱۹ |
| ۰/۲۸ | ۲/۴ | ۰/۹۵ | ۰/۱۷ | ۰/۰۱ | ۳/۱ | ۰/۱۵ | ۰/۳ | ۹۵/۰۳/۲۵ |
| ۰/۹ | ۰/۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱ | انحراف معیار |
| ۱/۷ | ۲/۲ | ۰/۹ | ۰/۲ | ۰/۰۱ | ۲/۸ | ۰/۱ | ۰/۳ | میانگین |
| ۵۱ | ۵ | ۵ | ۷/۱ | ۳۸ | ۶/۷ | ۲۳ | ۳/۳ | ضریب تغییرات (%) |

همانطور که در جدول و شکل‌ها دیده می‌شود تغییرات غلظت یون‌ها در نمونه‌ها بسیار اندک می‌باشد این نکته در ضریب تغییرات یون‌ها (جدول ۲-۴) نیز قابل مشاهده است. به طوری که کمترین ضریب تغییرات در یون‌های سولفات، منیزیم، کلسیم و بیکربنات و بیشترین ضریب تغییرات در یون‌های پتاسیم، کلر، سدیم مشاهده می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که یون‌های کلسیم، بیکربنات و منیزیم بیش از ۹۰ درصد از غلظت یون‌های هر نمونه را به خود اختصاص داده‌اند. البته از دلایل تغییرات زیاد یون‌های پتاسیم و کلر می‌توان به ناچیز بودن غلظت آنها اشاره نمود که در محاسبات خطای بیشتری از خود نشان می‌دهند.



شکل ۴-۱۲- تغییرات زمانی غلظت کاتیون‌های نمونه‌های چشمه کارستی ورسخواران از مهر ۱۳۹۴ تا خرداد ۱۳۹۵



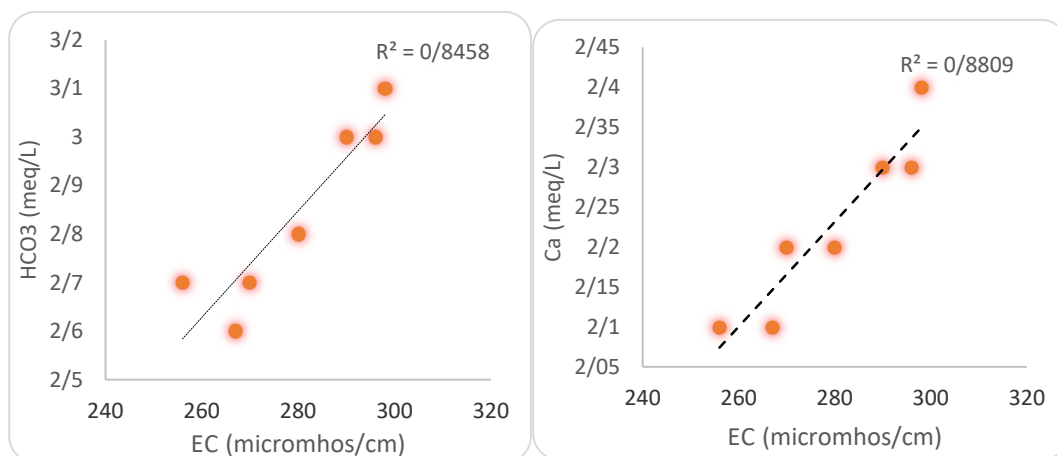
شکل ۴-۱۳- تغییرات زمانی غلظت آنیون‌های نمونه‌های چشمه کارستی ورسخواران از مهر ۱۳۹۴ تا خرداد ۱۳۹۵

۳-۳-۴- ضریب همبستگی بین هدایت الکتریکی و غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها

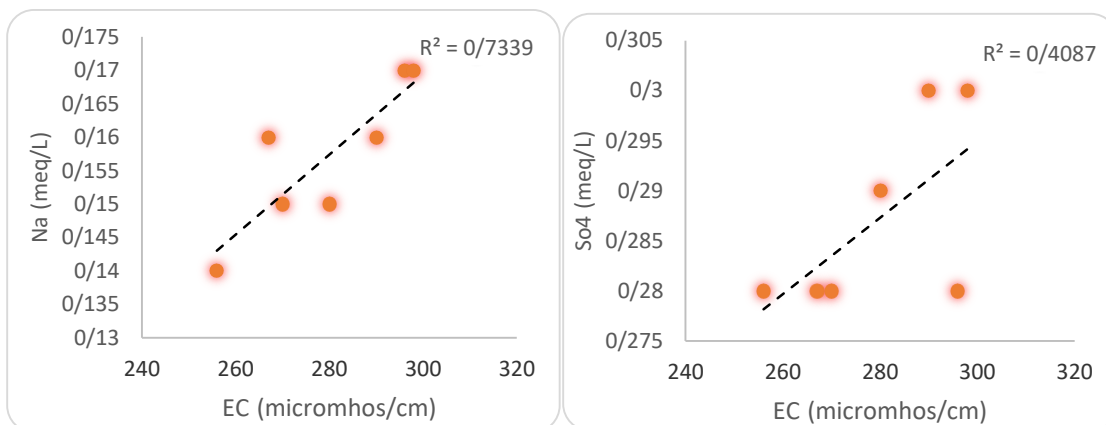
یک از روش‌های آماری در بررسی‌های کیفی آب، تعیین همبستگی بین یک جفت از متغیرهای مرتبط با یکدیگر می‌باشد. تعیین همبستگی بین غلظت یون‌ها و هدایت الکتریکی به طور گسترده‌ای به منظور بررسی‌های کیفی به کار می‌رود. معمولاً هرچه غلظت یون‌های محلول در آب بیشتر باشد، هدایت الکتریکی آب افزایش می‌یابد، لذا هدایت الکتریکی با غلظت املاح محلول در آب، رابطه مستقیم دارد.

به منظور تعیین ارتباط بین هدایت الکتریکی با یون‌های محلول نمودار تغییرات غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها در برابر هدایت الکتریکی ترسیم گردید است.

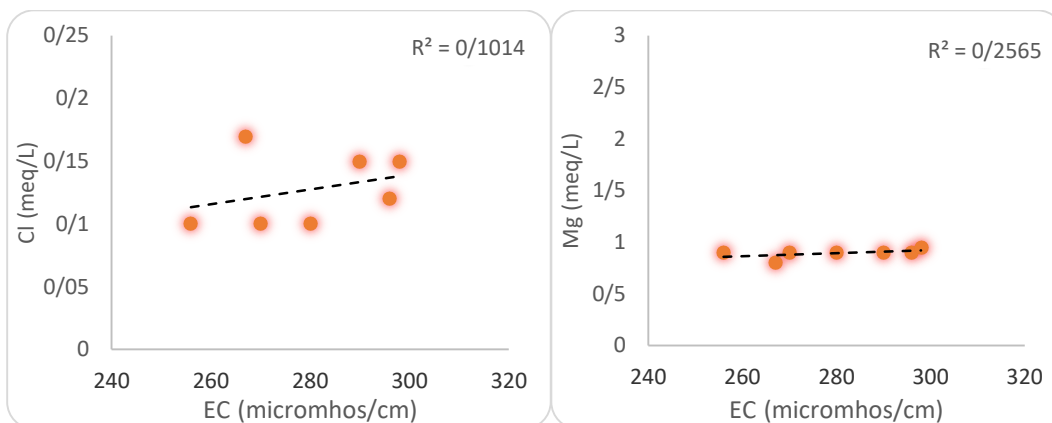
نمودارهای (۴-۱۶، ۴-۱۵، ۴-۱۴) به روشنی نشان می‌دهند که بین هدایت الکتریکی و برخی یون‌های محلول در نمونه‌های برداشت شده از آب چشمه ورسخواران همبستگی مثبت برقرار می‌باشد. با توجه به اطلاعات اولیه همچون جنس آبخوان (آهکی و دولومیتی) و زمان ماندگاری، مشاهده می‌شود که کمترین ضرایب همبستگی بین هدایت الکتریکی و غلظت املاح محلول، به ترتیب مربوط به یونهای پتاسیم، کلر، سولفات، منیزیم و بیشترین ضرایب همبستگی مربوط به غلظت یونهای سدیم، کلسیم و بی‌کربنات می‌باشد.



شکل ۴-۱۴- روند تغییرات یون بی‌کربنات (چپ) و کلسیم (راست) آب چشمه ورسخواران در برابر تغییرات هدایت الکتریکی در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴



شکل ۴-۱۵- روند تغییرات یون سولفات (راست) و سدیم (چپ) آب چشمه ورسخواران در برابر تغییرات هدایت الکتریکی در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴



شکل ۴-۱۶- روند تغییرات یون منیزیم (راست) کلر (چپ) آب چشمه ورسخواران در برابر تغییرات هدایت الکتریکی در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴

۴-۳-۴- پارامترهای کیفی محاسبه شده چشمه کارستی ورسخواران

با توجه به غلظت یونهای اصلی (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) برخی پارامترهای کیفی ثانویه از قبیل سختی کل (Total Hardness)، نسبت سدیم به مجموع کاتیون‌ها ($Na/\sum Catin$)، کل جامدات محلول (TDS)، نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg)، درصد سدیم (%Na)، درصد جذب سدیم (SAR) و شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت برای نمونه‌های برداشت شده از چشمه ورسخواران محاسبه و نتایج حاصله در جدول (۴-۷) ارائه شده است.

جدول ۳-۴- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های برداشته شده از چشمه کارستی ورسخواران از مهرماه ۱۳۹۴ تا خردادماه ۱۳۹۵

| شاخص‌های اشباع | | | | $\frac{Ca}{Mg}$ | SAR | $\frac{Na}{\sum cations}$ | درصد سدیم | کل مواد جامد محلول (mg/L) | سختی (mg/L) CaCO ₃ | تاریخ اندازه‌گیری |
|----------------|---------|-------|-------|-----------------|------|---------------------------|-----------|---------------------------|-------------------------------|-------------------|
| کلسیت | دولومیت | ژیپس | هالیت | | | | | | | |
| ۰/۱۸ | ۰/۰۸ | -۲/۵۷ | -۳۴/۹ | ۲/۶ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۲۶۴/۶ | ۱۵۹/۳ | ۹۴/۰۷/۰۸ |
| ۰/۱۸ | ۰/۰۸ | -۲/۵۴ | -۹/۲۷ | ۲/۶ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۲۶۶ | ۱۵۹/۳ | ۹۴/۰۸/۱۸ |
| ۰/۳۳ | ۰/۴۰ | -۲/۵۶ | -۹/۴۸ | ۲/۳ | ۰/۱۶ | ۰/۰۶ | ۰/۰۶ | ۲۴۰ | ۱۵۰/۳ | ۹۴/۰۹/۰۹ |
| ۰/۲۳ | ۰/۱۸ | -۲/۵۹ | -۹/۲۲ | ۲/۶ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۲۴۶ | ۱۴۴/۴ | ۹۴/۱۲/۰۷ |
| ۰/۲۲ | ۰/۲۰ | -۲/۵۹ | -۹/۵۱ | ۲/۵ | ۰/۱۲ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۲۳۷ | ۱۳۹/۴ | ۹۵/۰۱/۱۸ |
| ۰/۳۰ | ۰/۳۲ | -۲/۵۸ | -۹/۴۸ | ۲/۶ | ۰/۱۴ | ۰/۰۶ | ۰/۰۶ | ۲۴۱ | ۱۴۴/۴ | ۹۵/۰۲/۱۹ |
| ۰/۲۷ | ۰/۷۷ | -۲/۶۰ | -۹/۲۶ | ۲/۵ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۲۷۳ | ۱۶۶/۷ | ۹۵/۰۳/۲۵ |
| ۰/۰۶ | ۰/۳۴ | ۰/۰۲ | ۰/۱۲ | ۰/۱۱ | ۰/۰۱ | ۰ | ۰ | ۱۴/۹۷ | ۱۰/۰۲ | انحراف معیار |
| ۰/۲۴ | ۰/۲۹ | ۲/۵۸ | ۹/۳۸ | ۲/۵۳ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۲۵۳ | ۱۵۲ | میانگین |
| ۲۳/۷۴ | ۸۳/۵۰ | ۰/۸۰ | ۱/۳۲ | ۴/۳۴ | ۸/۷۵ | ۸/۷۴ | ۸/۱۰ | ۵/۹۳ | ۶/۶۰ | ضریب تغییرات (/.) |

۵-۳-۴- بررسی فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان چشمه کارستی ورسخواران

به منظور بررسی فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم در آبخوان چشمه کارستی ورسخواران، از نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت استفاده شده است.

برای محاسبه این نمایه‌ها از نرم افزار PHREE QC استفاده شده است. به طور کلی رابطه بین شاخص اشباع و اکتیویته یون‌ها به صورت معادله (۳) است.

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

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 چشمه کارستی ورسخواران برای نمونه‌های برداشتی مهرماه ۱۳۹۴ تا خردادماه ۱۳۹۵ در جدول (۲-۴) ارائه شده است.

همانطور که در جدول ملاحظه می‌شود نمایه‌های اشباع، همه نمونه‌های برداشتی از چشمه نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع و نسبت به ژیپس و هالیت تحت اشباع می‌باشند. حداقل نمایه‌های اشباع کلسیت به ترتیب برای نمونه‌های اسفندماه و حداکثر مقادیر برای نمونه‌های آذر و اردیبهشت‌ماه و می‌باشند. همچنین حداقل و حداکثر نمایه‌های اشباع دولومیت به ترتیب برای اسفندماه و خردادماه می‌باشند.

همان طور که در فصل‌های قبل عنوان شد آبخوان چشمه کارستی ورسخواران به طور غالب از سازنده‌های آهکی کرتاسه فوقانی و سازند آهکی دولومیتی لار تشکیل شده است. بنابراین می‌توان استنباط نمود که در این آبخوان انحلال کانی‌های کلسیت و دولومیت صورت گرفته است. با توجه به اختلاف در سرعت انحلال‌پذیری کلسیت نسبت به دولومیت و زمان ماندگاری آب در قسمت‌های مختلف آبخوان، نمونه‌ها نسبت به این دو کانی در درجات مختلفی از اشباع شدگی قرار دارند. همچنین از دلایل تحت اشباع بودن نمونه‌ها نسبت به کانی‌های هالیت و ژیپس عدم وجود سازندهایی از این نوع کانی‌ها می‌باشد.

۶-۳-۴- سختی کل

سختی کل (Total Hardness) عبارت است از مجموع کاتیون‌های کلسیم و منیزیم که بر حسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم محاسبه و بیان می‌شود.

با توجه به مقادیر سختی نمونه‌های برداشته شده از چشمه ورسخواران (جدول ۴-۲) ملاحظه می‌شود که تغییرات زمانی سختی کل بسیار اندک است، ضریب تغییرات کم سختی (۶/۶ درصد) بیان‌کننده سیستم جریان غالب افشان در آبخوان چشمه کارستی ورسخواران می‌باشد.

طبقه بندی (Todd, 1988) یکی از رایج ترین روش‌ها به منظور تعیین نوع آب بر اساس سختی کل می‌باشد. در این طبقه بندی آب‌ها به چهار گروه بر اساس میزان سختی کل تقسیم می‌شوند (جدول ۴-۵). بر این اساس تمامی نمونه‌های برداشت شده از چشمه ورسخواران در رده آب‌های نسبتاً سخت تا سخت قرار می‌گیرند.

جدول ۴-۴ طبقه بندی آب بر اساس سختی کل (Todd 1980)

| سختی کل (mg/L CaCO ₃) | |
|-----------------------------------|------------|
| میزان سختی | نوع آب |
| <۷۵ | نرم |
| ۷۵-۱۵۰ | نسبتاً سخت |
| ۱۵۰-۳۰۰ | سخت |
| >۳۰۰ | خیلی سخت |

۷-۳-۴- نسبت کلسیم به منیزیم

نسبت مولار غلظت یون کلسیم به غلظت یون منیزیم (Ca/Mg) اطلاعاتی را در مورد زمان ماندگاری آب در آبخوان کارستی (Moral, 2008) و جنس سنگ مخرنی (Langmuir, 1971) که چشمه از آن پدیدار می‌شود فراهم می‌کند. معمولاً نرخ (Ca/Mg) در چشمه‌های دولومیتی نزدیک به واحد می‌باشد زیرا درصد منیزیم لایه‌های آهکی زیاد است. نسبت‌های بین ۶ تا ۸ معرف سنگ مخزن از نوع سنگ آهک و هرچه این نسبت بیشتر شود درصد خلوص آهک بیشتر می‌شود. به منظور محاسبه این پارامتر، غلظت‌های دو کاتیون بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر در نظر گرفته می‌شود. بر اساس جدول (۴-۴) ملاحظه می‌گردد میانگین نسبت Ca/Mg برای کل نمونه‌های اندازه‌گیری شده برابر ۲/۵۳ می‌باشد. بنابر این با توجه به مطالب بالا می‌توان نتیجه گرفت که جنس بخشی از سفره آب زیرزمینی در حوضه آبخیز چشمه ورسخواران آهکی دولومیتی است.

در فصل یک گفته شد که آبخوان چشمه از ترکیبی از سازندهای دلیچای، لار و کرتاسه فوقانی تشکیل شده است که هر یک از این سازندها می‌توانند بر اساس جنس و ضخامت و دیگر ویژگی‌ها تاثیراتی بر روی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیای چشمه داشته باشند. همچنین طبق مطالعات پتروگرافی، سازند لار به شدت تحت تاثیر فرایند دلمییتی شدن قرار گرفته است. پس می‌توان گفت ضخامت، جنس و همچنین زمان ماندگاری آب در سازند آهکی دلمییتی لار از مهمترین عوامل هستند که نسبت Ca/Mg را چشمه کارستی ورسخوارن تحت تاثیر قرار می‌دهند.

۸-۳-۴- ارزیابی آب چشمه ورسخواران از طریق نمودارهای هیدرووشیمیایی

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، رسوب گذاری یا انحلال، تبادل یونی و بررسی زون‌های غالب کاتیونی و آنیونی تفاوت و شباهت بین نمونه‌ها استفاده می‌شود.

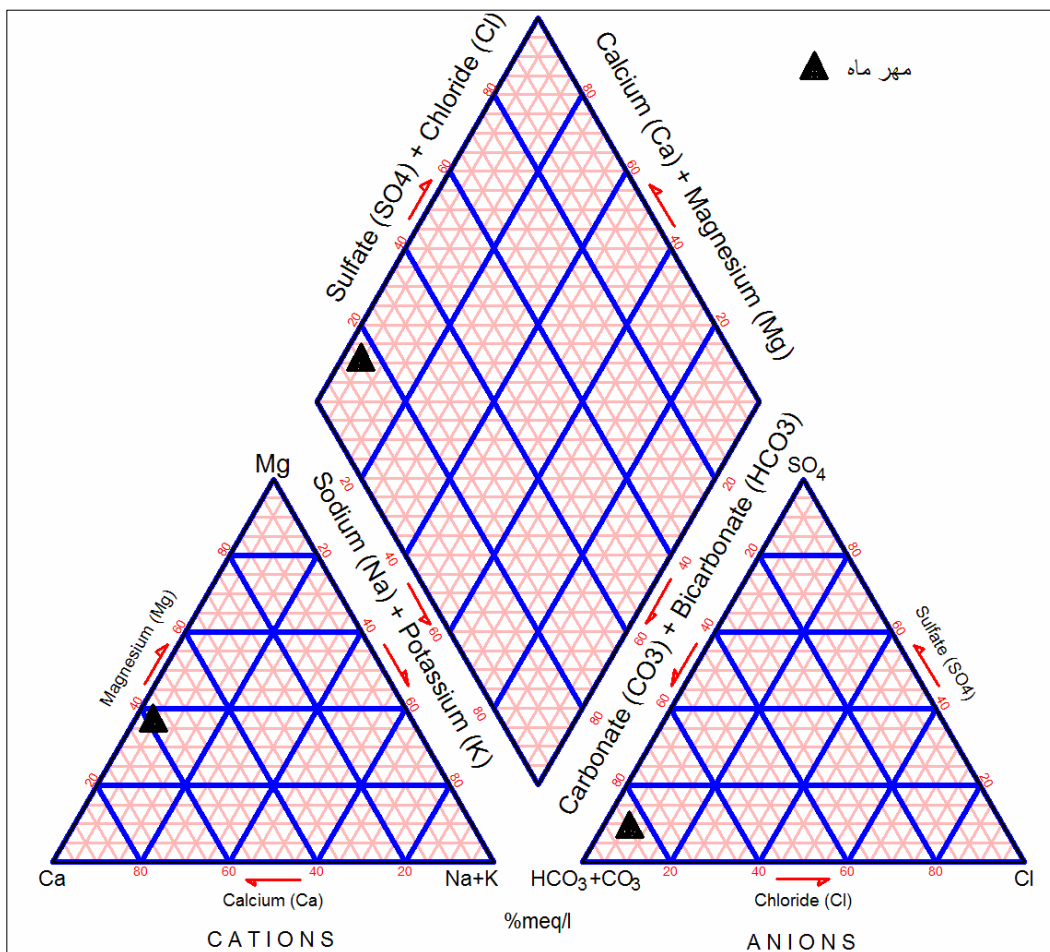
بدین منظور، نمودار پایپر برای نمونه‌ها برداشته شده از چشمه ترسیم گردید و به دلیل یکسان و ناچیز بودن روند تغییرات غلظت یون‌ها در همه آنها فقط یکی از آنها در نمودار (شکل ۴-۱۷) ارائه شده است. تغییرات غلظت همه کاتیون‌ها و آنیون‌ها در نمودار ترسیم شده بسیار ناچیز است، که تیپ آب چشمه را در رده رخساره غالب بیکربنات کلسیک قرار می‌دهد.

به طور کلی آبهایی که در این بخش از نمودار پایپر، قرار می‌گیرند غنی از $Ca + Mg$ و HCO_3 می‌باشند و محدوده‌ای با سختی موقت را به وجود می‌آورند. همچنین موقعیت قرارگیری کاتیون منیزیم در مثلث سمت چپ به وضوح نشان دهنده سنگ منشاء آهکی دلمییتی بخشی از آبخوان چشمه کارستی ورسخواران می‌باشد.

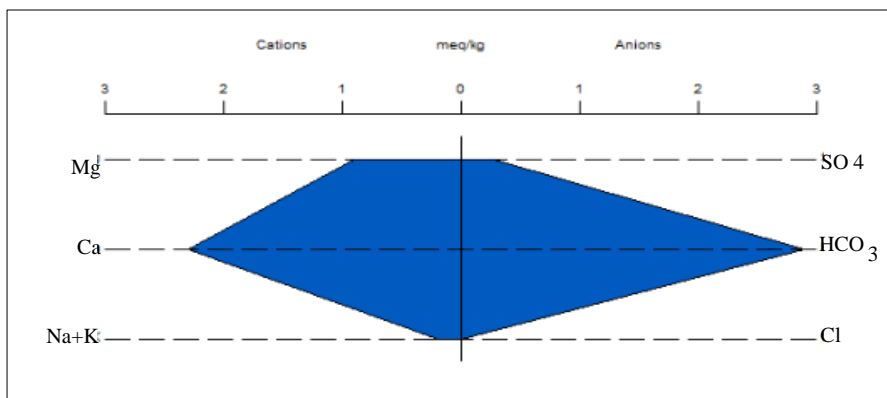
در ادامه به منظور بررسی هرچه بهتر تیپ نمونه‌ها آب چشمه، از نمودار استیف (Stiff) نیز استفاده شد است. در این نمودار، هر نمونه آب به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در آن غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر بر روی محور افقی رسم می‌گردد. شکل (۴-۱۸) نمودار

استیف ترسیم شده با استفاده از نرم افزار Aq.QA برای نمونه‌ها آب چشمه کارستی ورسخواران را نشان می‌دهد.

به دلیل یکسان بودن و ناچیز بودن روند تغییرات غلظت یون‌ها در همه آنها فقط یکی از نمونه‌ها در (شکل ۴-۱۷) ارائه شده است. همانطور که در شکل مشخص است بیشتر نمونه‌ها دارای آنیون غالب بیکربنات و کاتیون غالب کلسیم و منیزیم می‌باشند و به عبارتی تیپ آب چشمه ورسخواران بیکربنات کلسیم است. همچنین نمودار ترسیم شده به نوعی نشان دهنده آبخوانی با لیتولوژی آهکی دولومیتی برای چشمه کارستی ورسخواران می‌باشند.

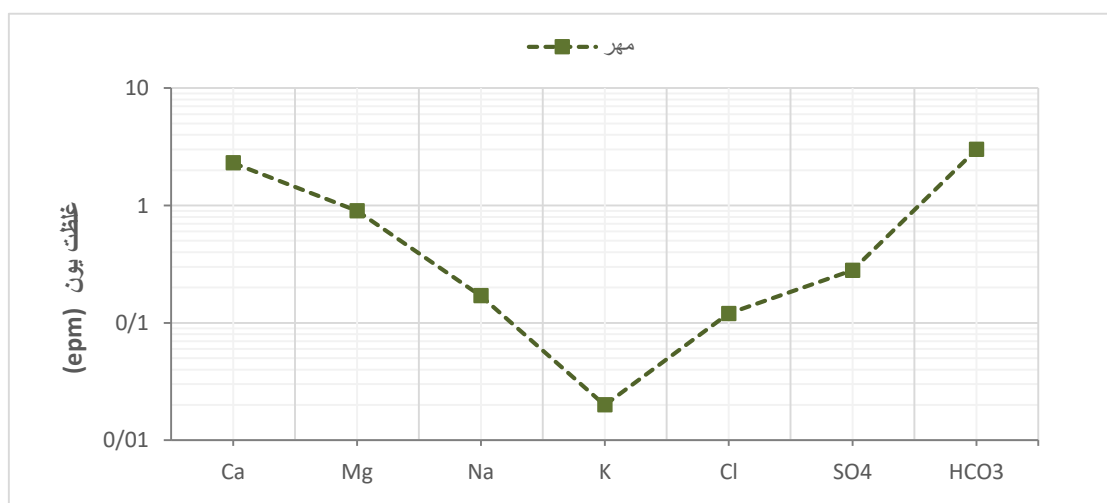


شکل ۴-۱۷- دیاگرام پایپر مربوط به نمونه‌های چشمه کارستی ورسخواران



شکل ۱۸-۴- نمودار استیف چشمه کارستی ورسخواران نمونه مهر ماه ۱۳۹۴

آبی که برای آشامیدن استفاده می‌شود باید حداقل ویژگی‌های کیفی را دار باشد. نمودار شولر یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای بررسی خصوصیات کیفی آب می‌باشد. به منظور بررسی منشا و روند تغییرات زمانی غلظت یون‌های محلول، نمودار شولر برای همه نمونه‌ها ترسیم گردید. یونهای کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بیکربنات، کلر و سولفات روی محور افقی این نمودار قرار می‌گیرند و غلظت هرکدام از یون‌ها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر روی محور لگاریتمی نمایش داده می‌شود. پس از ترسیم نمودار برای همه نمونه‌ها برداشته شده از چشمه در ماه‌های مختلف مشاهده شد خطی که، غلظت یون‌های یک نمونه را به هم متصل می‌کند موازی با خط مشابه با نمونه دیگر بوده و به نوعی توجیح کننده منشا یکسان برای همه نمونه‌ها برداشته شده از چشمه در فصول مختلف می‌باشد. به دلیل یکسان بودن روند تغییرات غلظت یون‌ها، نمودار شولر فقط برای نمونه مهرماه در شکل (۱۴-۴) ارائه شده است.



شکل ۴-۱۹- نمودار شولر نمونه‌های چشمه کارستی ورسخواران

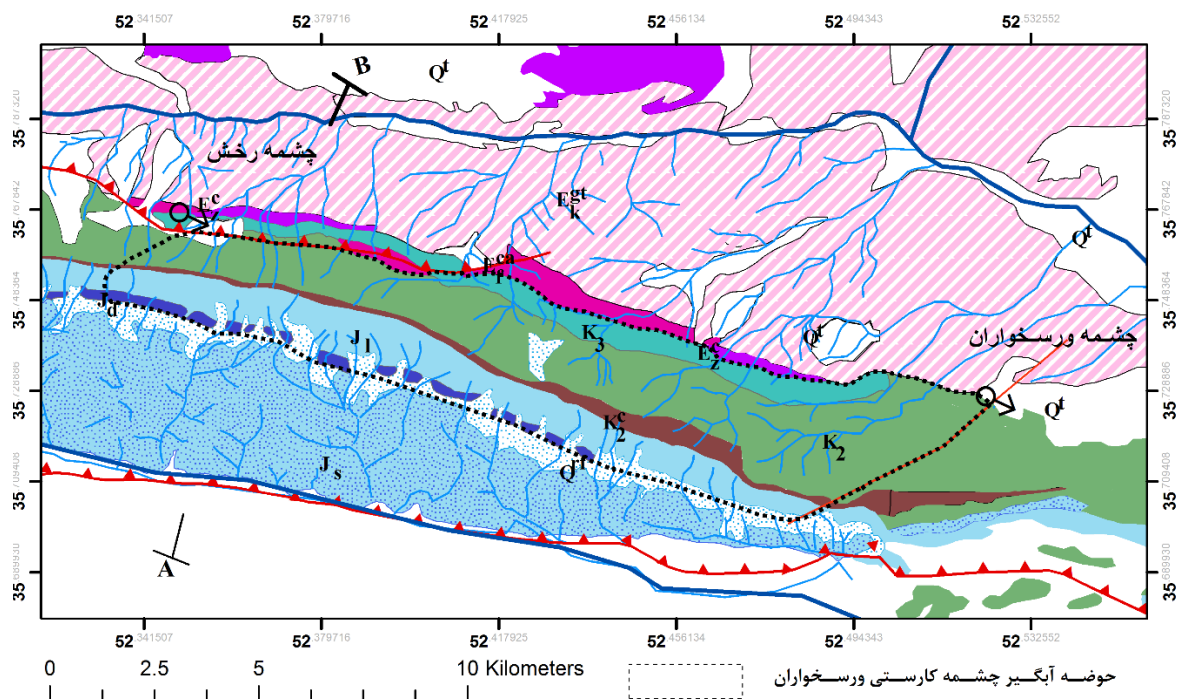
۴-۴- تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی ورسخواران

بسیاری از کارشناسان به این عقیده هستند که شناسایی منشأ تغذیه احتمالی هر چشمه کارستی مستلزم تعیین پارامتر مهمی به نام حوضه آبرگیر (Catchment area) می‌باشد. منظور از مرزهای حوضه، ناحیه‌ای است که تمام نقاط روی این حوضه در رساندن آب به نقطه خروجی یا چشمه سهمیم می‌باشند. مساحت حوضه آبرگیر و وضعیت هندسی آبخوان کارستی عواملی هستند که نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کنند و به شرایط هیدروژئولوژیکی بستگی دارند. تعیین حوضه آبرگیر یک نقطه آغاز برای همه آنالیزهای هیدروژئولوژیکی و همین‌طور به عنوان یک پایه و اساس برای حفاظت از ذخایر آبی، مدیریت و مدل‌سازی مفهومی چرخه آب در توده‌های کارستی می‌باشد. روش‌های متفاوتی جهت تعیین حوضه آبرگیر استفاده می‌شوند 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 چشمه کارستی ورسخواران به ترتیب مراحل زیر انجام شده است:

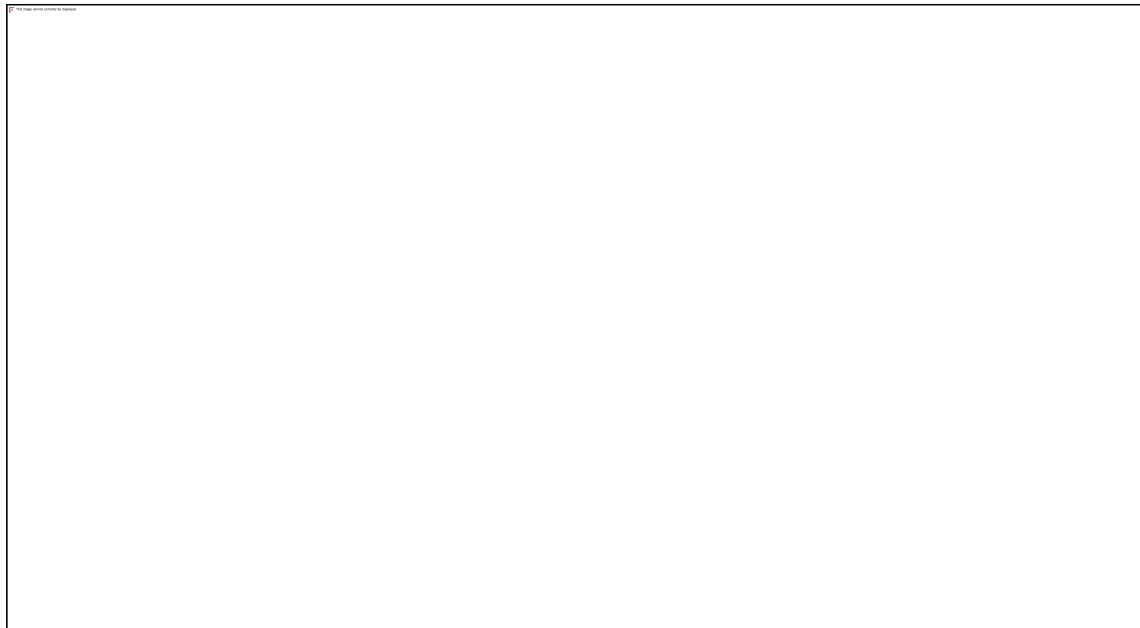
۴-۴-۱- ترسیم حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه کارستی ورسخواران

به منظور ترسیم حوضه آبرگیر چشمه کارستی ورسخواران ابتدا با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مدر نظر قرار دادن حوضه آبرگیر چشمه‌های مجاور، محدوده حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران به صورت مقدماتی ترسیم گردید. شکل (۴-۱۵) نقشه حوضه آبرگیر ترسیم شده را در نرم‌افزار ARC GIS نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۰- نقشه حوضه آبخیز هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی ورسخواران

همان طور که در مقطع زمین‌شناسی ارتفاعات قره‌داغ مشاهده می‌شود، (شکل ۱-۳) بخشی از حوضه آبخیز چشمه ورسخواران به دلیل شیب لایه‌های آهک لار و دلیچای در دامنه جنوبی ارتفاعات قره‌داغ قرار دارد که این بخش‌ها تصحیح و به حوضه آبخیز مقدماتی چشمه اضافه شده‌اند. حوضه آبخیز چشمه ورسخواران با در نظر گرفتن حداکثر آبدهی چشمه رخس (۵۰۰ لیتر بر ثانیه) از حوالی این چشمه ترسیم شده است. به علت وجود سدهای هیدروژئولوژیکی همچون گسل نمرود، سازند ماسه سنگی فجین و سازند کرج در مرز شمالی حوضه، این مرز در امتداد سدهای هیدروژئولوژیکی ذکر شده تا حوالی چشمه کارستی ورسخواران امتداد داده شده است. در شرق حوضه نیز این مرز موازی با گسل ورسخواران به سمت جنوب غربی امتداد پیدا می‌کند. در دامنه جنوبی نیز مرزهای جنوبی حوضه به دلیل رخنمون سازند شمشک (مانع هیدروژئولوژیکی) موازی با این سازند تعیین شده است. شکل (۴-۱۶) محدوده حوضه آبخیز مقدماتی را در نرم افزار Google Earth نمایش می‌دهد. بر اساس محدوده مشخص شده، مساحت حوضه آبخیز چشمه ورسخواران حدود ۴۷ کیلومتر مربع برآورد شده است.



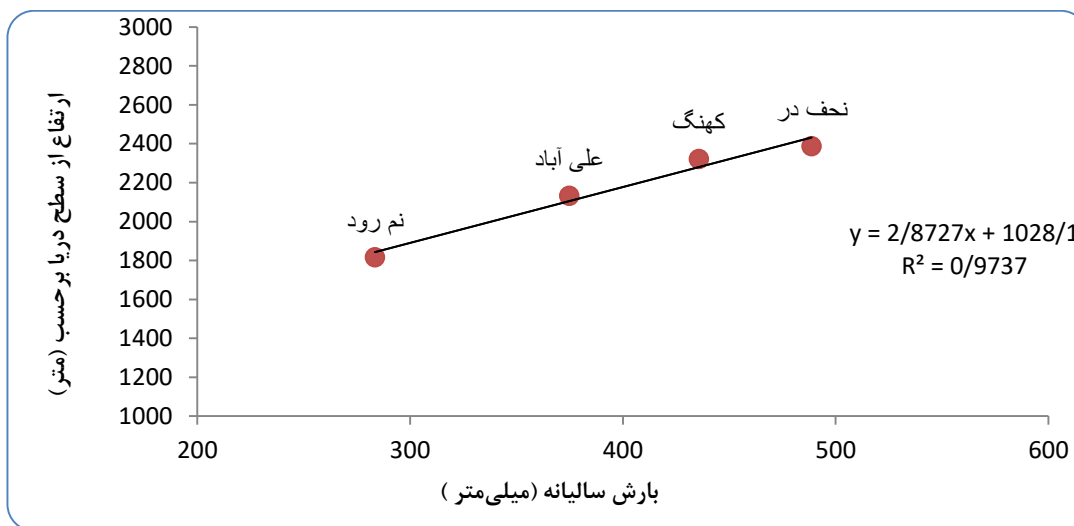
شکل ۴-۲۱- محدوده حوضه آبخیز مقدماتی چشمه کارستی ورسخواران در نرم افزار Google Earth

۲-۴-۴- برآورد میانگین بارش در محدوده تعیین شده

تعیین میانگین بارش در محدوده تعیین شده از نظر هیدروژئولوژیکی و بررسی شرایط لازم جهت تحولات عوارض کارستی و نفوذ نزولات جوی اهمیت دارد. به منظور تعیین وضعیت بارش در حوضه آبخیز چشمه ورسخواران، از آمار و اطلاعات مشترک ایستگاه‌های باران سنجی نجفدر، نمرود، کهنک و علی آباد دوشتان در موقعیت نزدیک نسبت به حوضه آبخیز چشمه استفاده شده است. از آنجایی که بخشی از محدوده ترسیم شده در دامنه جنوبی کوه قره‌داغ واقع شده است ایستگاه کهنک از این بخش و ایستگاه‌های علی آباد دوشتان و نجفدر از دامنه شمالی و همچنین ایستگاه نمرود از ارتفاعات کم منطقه انتخاب شده است. جدول (۴-۵) موقعیت ایستگاه‌ها ذکر شده را نشان می‌دهد. با استفاده از مقادیر بارندگی مشترک در هر چهار ایستگاه و ارتفاع آنها منحنی ارتفاع بارندگی منطقه مورد مطالعه ترسیم شد است. شکل (۴-۱۷) نمودار ارتفاع - بارندگی به همراه معادله خطی و ضریب همبستگی آن را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در اطراف حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران

| ارتفاع (متر) | موقعیت جغرافیایی | | میانگین بارندگی ۸ ساله (میلی متر) | حوضه آبرگیر | نوع ایستگاه | نام ایستگاه | ردیف |
|--------------|------------------|---------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------------|------|
| | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | | | | | |
| ۲۳۸۸ | ۵۲-۲۲ | ۳۵-۴۷ | ۴۸۹ | نمرود | باران سنجی | نجفدر | ۱ |
| ۱۸۱۶ | ۵۲-۳۹ | ۳۵-۴۳ | ۲۸۴ | نمرود | باران سنجی | نمرود | ۲ |
| ۲۳۲۲ | ۵۲-۲۹ | ۳۵-۴۱ | ۴۳۶ | دلیچای | باران سنجی | کهنک | ۳ |
| ۲۱۳۳ | ۵۲-۳۰ | ۳۵-۴۶ | ۳۷۵ | نمرود | باران سنجی | علی آباد دوشتان | ۴ |



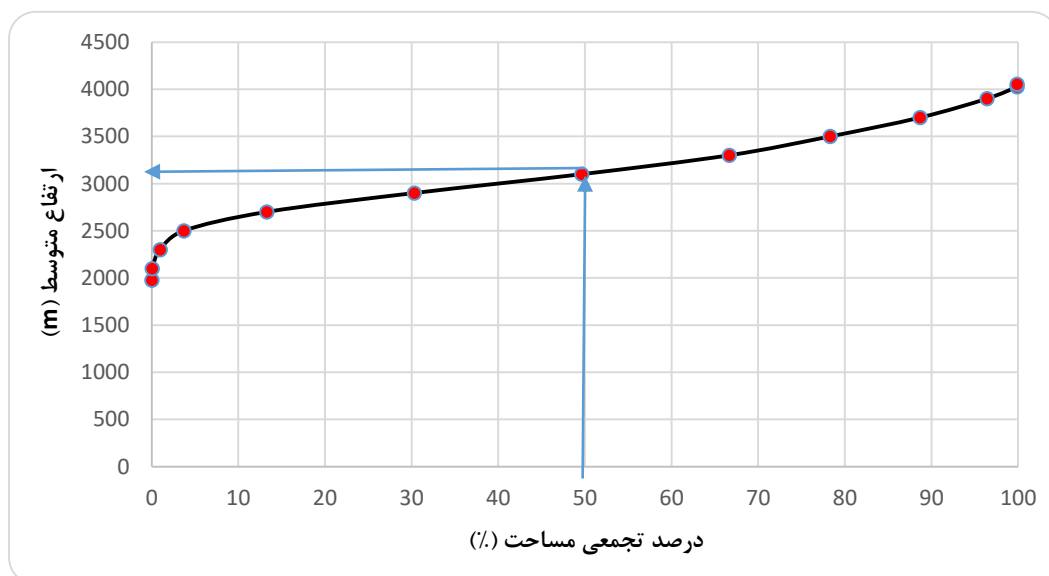
شکل ۴-۲۲- رابطه بین ارتفاع بارندگی در ایستگاه‌های پلور و نجفدر

همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود همبستگی بالایی بین میانگین بارش سالانه و ارتفاع در هر چهار ایستگاه وجود دارد. از آنجایی که حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران در ارتفاع بالائی نسبت به ایستگاه‌های هواشناسی قرار دارد، در ادامه ارتفاع متوسط محدوده محاسبه خواهد شد.

۴-۴-۳- ارزیابی ارتفاع متوسط در حوضه آبرگیر چشمه

میزان نزولات جوی به ارتفاع محیط بستگی دارد و در یک منطقه معین با افزایش ارتفاع میزان بارش بیشتر خواهد شد. با توجه به اهمیت ارتفاع حوضه آبرگیر در میزان نزولات جوی، به منظور تعیین ارتفاع

متوسط در حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران از تصاویر ماهواره لندست، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، با تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده گردید. همچنین به منظور آنالیز مدل رقومی (DEM) از نرم افزار ARC GIS استفاده شد است. از روی مدل رقومی حداقل ارتفاع در منطقه ۱۹۵۷ متر و حداکثر ارتفاع ۴۰۵۵ متر تشخیص داده شد. از موقعیت حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه که مربوط به ارتفاعات بالاتر از مظهر چشمه می باشد جهت ارزیابی ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر استفاده شده است. به دلیل وجود اختلاف ارتفاع زیاد در حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه، دسته بندی خطوط ارتفاعی محدوده مورد مطالعه در دسته های ۲۰۰ متری تهیه شده و در نهایت جدول هیپسومتری (۴-۶) تنظیم گردید است. نمودارهای هیپسومتری (۴-۱۸) براساس داده های این جدول ترسیم شده است. با توجه به جدول مذکور و براساس منحنی هیپسومتری مشاهده می شود که مناطقی با ارتفاع بین ۲۶۰۰ متر تا ۳۶۰۰ متر بیشترین فراوانی را دارند که این امر را می توان به وضوح در منحنی هیپسومتری مشاهده نمود. براساس منحنی هیپسومتری، ارتفاع متوسط منطقه مورد مطالعه برابر با ۳۱۰۰ متر برآورد گردید. همانطور که نمودار (۴-۱۷) به روشنی نشان می دهد، ارتباط مثبتی بین میزان بارش و افزایش ارتفاع در منطقه مورد مطالعه وجود دارد و بر اساس معادله ارتفاع - بارش و قرار دادن ارتفاع متوسط ۳۱۰۰ متری در آن، متوسط بارندگی حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران ۷۲۲ میلی متر محاسبه شده است.



شکل ۴-۲۳- نمودار هیپسومتری حوضه آبرگیر چشمه کارستی ورسخواران

جدول ۴-۶- جدول داده های هیپسومتری ارتفاعات قره داغ

| درصد مساحت تجمعی (%) | درصد مساحت (%) | ارتفاع متوسط (m) | مساحت (km ²) | محدوده ارتفاعی (m) | |
|-------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|------|
| ۰/۰۶ | ۰/۰۶ | ۱۹۷۸/۵ | ۰/۱۱ | ۱۹۵۷ | ۲۰۰۰ |
| ۰/۹۶ | ۰/۹۰ | ۲۱۰۰ | ۱/۵۳ | ۲۰۰۰ | ۲۲۰۰ |
| ۳/۷۰ | ۲/۷۴ | ۲۳۰۰ | ۴/۶۵ | ۲۲۰۰ | ۲۴۰۰ |
| ۱۳/۲۸ | ۹/۵۸ | ۲۵۰۰ | ۱۶/۲۸ | ۲۴۰۰ | ۲۶۰۰ |
| ۳۰/۲۹ | ۱۷/۰۱ | ۲۷۰۰ | ۲۸/۹۱ | ۲۶۰۰ | ۲۸۰۰ |
| ۴۹/۶۳ | ۱۹/۳۴ | ۲۹۰۰ | ۳۲/۸۶ | ۲۸۰۰ | ۳۰۰۰ |
| ۶۶/۶۵ | ۱۷/۰۲ | ۳۱۰۰ | ۲۸/۹۳ | ۳۰۰۰ | ۳۲۰۰ |
| ۷۸/۳۰ | ۱۱/۶۵ | ۳۳۰۰ | ۱۹/۷۹ | ۳۲۰۰ | ۳۴۰۰ |
| ۸۸/۶۷ | ۱۰/۳۸ | ۳۵۰۰ | ۱۷/۶۳ | ۳۴۰۰ | ۳۶۰۰ |
| ۹۶/۳۸ | ۷/۷۱ | ۳۷۰۰ | ۱۳/۱۰ | ۳۶۰۰ | ۳۸۰۰ |
| ۹۹/۸۶ | ۳/۴۸ | ۳۹۰۰ | ۵/۹۲ | ۳۸۰۰ | ۴۰۰۰ |
| ۹۹/۸۶ | ۰/۰۱ | ۴۰۲۷ | ۰/۲۱ | ۴۰۰۰ | ۴۰۵۵ |
| ۱۰۰ | - | - | ۱۶۹/۹۱ | مجموع | |

۴-۴-۴- تعیین درصد تغذیه سالیانه در محدوده 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 با استفاده از نظر کارشناسی و مقایسه منطقه با مناطق مشابه نسبت به تخمین درصد تغذیه سالیانه اقدام نمود. به منظور تخمین درصد نفوذ در حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران بازدیدهای صحرایی از منطقه به عمل آمد. با توجه به درصد پوشش خاک، توسعه فضاهای انحلالی، مشاهده عوارض کارستی بزرگ مقیاس (فروچاله) تنها در بخش کوچکی از حوضه آبرگیر و شیب زیاد ارتفاعات بخصوص در دامنه جنوبی کوه قره‌داغ، درصد نفوذ در محدوده مورد نظر ۵۵ درصد برآورد شد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که حدود ۰/۵۵ درصد از کل بارش‌های (برف و باران) صورت گرفته در منطقه به درون آبخوان نفوذ می‌یابند؛ بنابراین در محدوده حوضه آبرگیر چشمه حدود ۳۹۷ میلی‌متر از کل بارش‌های منطقه (۷۲۱ میلی‌متر) به درون آبخوان نفوذ یافته است.

۵-۴-۴- محاسبه حجم تغذیه سالیانه برای حوضه آبرگیر مقدماتی

در این مطالعه حجم تغذیه سالیانه در حوضه آبرگیر مقدماتی با استفاده از معادله زیر محاسبه شده است.

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

که 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 مترمربع و در نهایت V حجم تغذیه سالیانه چشمه با واحد مترمکعب می‌باشد. برای چشمه کارستی ورسخواران حجم تغذیه سالیانه حدود $۱۸/۷$ میلیون مترمکعب برآورد شده است.

۶-۴-۴- محاسبه حجم تخلیه سالیانه چشمه ورسخواران

به منظور محاسبه حجم تخلیه سالیانه از منحنی فرود چشمه که شامل یک رژیم جریان می‌باشد استفاده شده است. حجم تخلیه سالیانه چشمه کارستی ورسخواران با استفاده معادله (۵) محاسبه گردید.

$$V_t = 86400 \left(\frac{(Q_0 - Q_1)}{\alpha_1} \right) \quad \text{معادله (۵)}$$

در این رابطه Q_0 نرخ آبدهی در شروع رژیم تخلیه چشمه Q_1 نرخ آبدهی در انتهای رژیم تخلیه α_1 ظریب فروکش در رژیم تخلیه می‌باشد. حجم تخلیه سالیانه برای آبخوان چشمه کارستی ورسخواران در طول سال آبی (۱۳۹۴) $۲۰/۷$ میلیون متر مکعب محاسبه شده است.

۷-۴-۴- ارزیابی صحت تعیین حوضه آبرگیر مقدماتی

با استفاده از مقادیر بارش، درصد تغذیه سالیانه و مساحت حوضه آبرگیر مقدماتی، حجم تغذیه سالیانه آبخوان حدود $۱۸/۷$ میلیون مترمکعب برآورد شد و همچنین بر اساس نتایج آبدهی چشمه ورسخواران حجم تخلیه سالیانه از طریق چشمه حدود $۲۰/۷$ میلیون مترمکعب محاسبه گردید. با توجه به عدم پیچیدگی زمین‌شناسی و همچنین خطای نسبی ناچیز (۰.۱) بین مقادیر تغذیه و تخلیه سالیانه می‌توان این چنین نتیجه گرفت که حوضه آبرگیر ترسیم شده مقدماتی، از دقت مناسبی برخوردار بوده و می‌توان محدوده تعیین شده را به عنوان حوضه آبرگیر چشمه ورسخواران محسوب نمود.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

در این فصل نتایج حاصله از این پژوهش با عنوان بررسی خصوصیات هیدروژنولوزیکی و هیدروژنوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران به طور مختصر آورده شده است و در انتها سعی شده برای انجام مطالعات تکمیلی و پژوهش های بعدی بر روی چشمه پیشنهادهایی ارائه شود.

۵-۱- نتیجه گیری

همانطور که در فصل های قبلی این پژوهش مشاهده شد، به منظور بررسی خصوصیات هیدروژنولوزیکی و هیدروژنوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه و ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبگیر چشمه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. از مهمترین آنها می توان به بررسی ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبگیر، بررسی هیدروگراف چشمه، تعیین حوضه آبگیر چشمه و تحلیل روند تغییرات هدایت الکتریکی و یونهای اصلی اشاره نمود. در زیر نتایج حاصل از مطالعه در چهار بند آورده شده است.

الف) ارزیابی ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبگیر چشمه

ارزیابی های ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبگیر نشان می دهد که سنگ های برهنه، کارنها نسبتاً عمیق، حفرات انحلالی و چشمه های کارستی به عنوان مهم ترین و فراوانترین عوارض کارستی در محدوده مطالعاتی می باشد. درحالیکه سایر عوارض توسعه یافته کارستی مانند گودی های مسدود و فروچاله ها، تنها در بخشهای محدودی (مساحت ۲/۲ کیلومتری) از منطقه و در ارتفاعات بالا (۲۸۰۰ متر به بالا) مشاهده می شوند.

ب) بررسی هیدروگراف چشمه و ضریب تغییرات پارامترها

هیدروگراف چشمه کارستی ورسخواران نشان می دهد که پاسخ چشمه ورسخواران به تغذیه به سرعت اتفاق نمی افتد به طوری که حداکثر آبدهی چشمه در اواخر خردادماه مشاهده می شود در صورتی که اکثر بارش های منطقه در اواخر بهمن ماه و اردیبهشت ماه رخ می دهند. در واقع زمان تاخیر ایجاد شده در هیدروگراف از کشیدگی و طویل بودن حوضه آبگیر و نوع سیستم غالب جریان در آن می باشد. در منحنی فرود چشمه کارستی ورسخواران تنها یک رژیم مشاهده گردید که دارای شیب بسیار ناچیز می باشد. از طرفی شیب منحنی فروکش چشمه حدوداً برابر ۰/۰۰۳ برآورد شد که، می تواند به دلیل

کشیدگی حوضه آبخیز، وجود سازندهایی با تراوایی اندک (سازند دلیچای) در آبخوان و باقی ماندن برف در انتهای حوضه آبخیز تا زمان طولانی باشد.

با توجه به آبدهی نسبتاً بالای چشمه و وجود فروچاله و گودی مسدود در حوضه آبخیز چشمه و همچنین ضریب تغییرات اندک پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه، می‌توان این چنین اظهار نظر نمود که سیستم غالب جریان در آبخوان تغذیه کننده چشمه و رسخواران از نوع مجرای-افشان می‌باشد.

ج) تغییرات هدایت الکتریکی و یونهای اصلی

نتایج حاصل از بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی نشان می‌دهند که شاخص اشباع کانی‌های کلسیت و دولومیت برای همه نمونه‌ها برداشته شده در حالت اشباع می‌باشند. میزان اشباع شدگی برای کانی کلسیت بیشتر از دولومیت و همچنین میزان اشباع شدگی دولومیت بیشتر از هالیت و ژپس می‌باشد. نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg) همه نمونه‌ها در حدود ۲/۵ می‌باشند که این نسبت از Ca/Mg نشان دهنده انحلال دولومیت در سنگ مخزن آبخوان چشمه و زمان ماندگاری طولانی آب در آن باشد. نتایج ذکر شده نیز می‌تواند تاییدی بر وجود سنگ منشا آهکی- دولومیتی (سازند لار) و حاکمیت سیستم جریان افشان در آبخوان باشد.

بر پایه نتایج به دست آمده از ترسیم نمودارهای هیدروشمیایی، تیپ و رخساره هیدروژئوشیمیایی چشمه بیکربنات کلسیک مشخص گردید. بر اساس نمودارهای پایپر در همه نمونه‌ها تنها یک رخساره غالب بیکربنات کلسیک دیده می‌شود. البته پس از یون‌های ذکر شده منیزیم دومین کاتیون غالب می‌باشد که در انطباق با طبیعت آهکی- دولومیتی بخشی از آبخوان چشمه و زمان ماندگاری آب در آبخوان چشمه می‌باشد. همچنین نمونه‌ها از نظر سختی کل در رده آب‌های سخت تا نسبتاً سخت قرار می‌گیرند و بر اساس تفاسیر صورت گرفته بر روی نمودارهای شولر، استیف و پایپر نمونه‌های چشمه کارستی و رسخواران، دارای منشا یکسان می‌باشند.

د) حوضه آبخیز چشمه

حوضه آبخیز چشمه با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و لحاظ نمودن حوضه آبخیز چشمه‌های مجاور، ترسیم گردید. براساس محدوده مشخص شده، مساحت حوضه آبخیز چشمه و رسخواران حدود ۴۷ کیلومترمربع برآورد شد. برای محدوده حوضه آبخیز مشخص شده

ارتفاع متوسط از طریق نقشه هیپسومتری ۳۱۰۰ متر تعیین گردید. برای ارتفاع متوسط حوضه مشخص شده میانگین بارش سالیانه از روش نمودار ارتفاع-بارش ایستگاههای مجاور برابر با ۷۲۲ میلیمتر تعیین گردید. با توجه به بازدهای صحرائی و ارزیابی درصد پوشش خاک، توسعه فضاهای انحلالی و سایر عوارض ژئومورفولوژیکی کارست درصد تغذیه سالیانه در محدوده مورد نظر برابر با ۵۵ درصد برآورد شد. حجم تغذیه سالیانه در حوضه آبگیر مشخص شده برابر با حدود ۱۸/۷ میلیون مترمکعب برآورد شد. علاوه بر این حجم تخلیه سالیانه چشمه از طریق هیدروگراف سالیانه چشمه برابر با حدود ۲۰/۷ میلیون مترمکعب محاسبه گردید. مقایسه حجم تغذیه و تخلیه سالیانه بیانگر خطای نسبی حدود ۱۰٪ درصد می‌باشد. عدم پیچیدگی زمین‌شناسی همچنین خطای ناچیز بین تغذیه و تخلیه سالیانه موید این است که حوضه آبگیر ترسیم شده از دقت مناسبی برخوردار بوده است.

۵-۲- پیشنهادها

برای هرچه بهتر انجام شدن مطالعات تکمیلی و پژوهشهای بعدی بر روی چشمه کارستی ورسخواران 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 آبهای خروجی از چشمه
۳. بسترسازی محل خروج آب چشمه و نصب اشل برای اندازه‌گیری دقیق آبدهی چشمه

منابع فارسی:

۱. اصغری، م.، کهنسال قدیم وند، ن.، ناصری، ح. (۱۳۹۳) "پتروگرافی و ژئوشیمی دولومیت‌های بخش زیرین سازند لار در البرز مرکزی، جنوب خاوری بهشهر"، فصلنامه زمین، سال نهم، شماره ۳۴.
۲. بهنیافر، ا.، قنبرزاده، ه. (۱۳۹۴) "کتاب ژئومورفولوژی کارست"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا.
۳. داودی، م.، محمدی، ح.، بای، ن.، (۱۳۸۹) تحلیل و پیش بینی عناصر اقلیمی مشهد، مجله علمی و فنی نیوا، شماره ۷۱.
۴. درویش‌زاده، ع.، (۱۳۷۰)، "زمین‌شناسی ایران" انتشارات امیرکبیر.
۵. سازمان برنامه و بوجه - وزارت نیرو، (۱۳۷۵) "دستورالعمل مطالعات فیزیوگرافی در حوضه‌های آبریز" نشریه شماره ۱۶۰.
۶. علیزاده، ا.، (۱۳۸۴)، "اصول هیدروژئولوژی کاربردی" انتشارات آستان قدس رضوی.
۷. محمدی، ی.، (۱۳۸۳)، "هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و آلودگی آبهای زیرزمینی منطقه رامسر" پایان نامه کارشناسی ارشد آبشناسی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی تهران.
۸. ملکی، ا.، (۱۳۸۰)، "تحولات اشکال کارستی و نقش آن در شناسایی منابع طبیعی با تکیه بر منابع آب زیرزمینی در ناهمواریهای زاگرس (بیستون - پراو)" رساله دوره دکترا ژئومورفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس
۹. بانک داده های سازمان آب منطقه‌ای استان تهران
۱۰. نقشه زمین شناسی شهرستان دماوند، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور.
۱۱. نقشه زمین شناسی استان سمنان، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور
۱۲. عضنفری، م.، (۱۳۹۵) گفتگوی شفاهی، عضو هیئت علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی، گفتگوی شفاهی
۱۳. اصغری، م.، کهنسال، ن.، ناصری، ح.، مختارپور، ح.، (۱۳۹۳) "پتروگرافی و ژئوشیمی دولومیت‌های بخش زیرین سازند لار در البرز مرکزی، جنوب خاوری بهشهر" فصلنامه زمین، سال نهم، شماره ۳۴.
۱۴. ضیاء، ح.، (۱۳۹۵)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "ارزیابی توسعه کارست در کوه‌های آهکی آهنگران، شمال شرق بیرجند" دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۱۵. کریمی وردجانی ح.، (۱۳۸۹) "هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها)" انتشارات ارم شیراز، ص ۳۳۹.
۱۶. محمدی بهزاد، ح. ر.، چرچی، ع.، کلانتری، ن.، (۱۳۹۴) "بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی سبزآب، شمال شرق استان خوزستان" مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۵.

۱۷. نوری، م.، کرمی، غ.ح.، کریمی، حاجی.، (۱۳۸۹) "بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی آبدانان" همایش ملی آب پاک.

۱۸. شکری، م.، کرمی، غ.ح.، ج.ا.، (۱۳۹۰) "بررسی توسعه کارست در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی، GIS و RS" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۱۹. مینویی، ارسطو.، کرمی، غ.ح.، امیدی، پ.، (۱۳۸۹) "هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی چشمه‌های کارستی قلوژ و تلوکسان در کوه‌های شاهو" نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران.

منابع انگلیسی:

1. Raeisi, E., (2002), *Carbonate Karst Caves In Iran. In: Kranjc A (Ed) Evolution Of Karst: From Prekarst To Cessation, Ljubljana-Postojna. 339–344*
2. Demiroglu, M., (2016), *Classification Of Karst Springs For Flash-Flood-Prone Areas In Western Turkey* : Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 1473–1486, 2016
3. Beynen, P, (2011), *Karst Management*: Department Of Geograpy, Environment And Planning, University Of South Florida.
4. Andrew, Aet All., (2010), Presentation, Advances In Research In Karst Media 19, Doi 10.1007/978-3-642-12486-0.
5. 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 Type, P 180.
6. Milanovic P., (1981) "Karst Hydrogeology" Water Resources Pubns, P 434.
7. White W.D., (1988), "Geomorphology And Hydrology Of Karst Terrainns" Oxford University Press, Oxford, P 464.
8. Kresic, N., Stevanovic, Z., (2010) "Groundwater Hydrology Of Springs" Butterworth-Heinemann Is An Imprint Of Elsevier
9. 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.
10. Atkinson, T.C., (1977). Diffuse Flow And Conduit Flow In Limestone Terrain In The Mendip Hills, Somerset (Great Britain). J. Hydrol., 35: 93--110.
11. 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

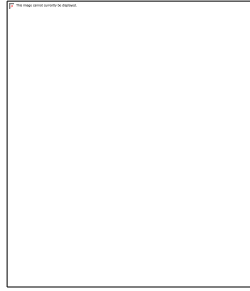
12. Chang, Y., Wu, J., Liu, L., (2015) "Effects Of The Conduit Network On The Spring Hydrograph Of The Karst Aquifer" *Journal Of Hydrology* 527 (2015) 517–530
13. Eftimi, R., Benderev, A., (2007) "Utilization Of Hydrochemical Data For Characterization Of The Karst System& Example Of *Iskrets* Springs, Bulgaria" *Review Of The Bulgarian Geological Society*, Vol. 68, Part 1—3, 2007, P. 167—174
14. 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.
15. Fiorillo, F., Guadagno, F.M., (2010) "Analysis Of Spring Discharges During Drought Example From Karst Systems Of Southern Italy" *Advances In Research In Karst Media*, Key Laboratory Of Karst Dynamics, Institute Of Karst Geology, Doi 10.1007/978-3-642-12486-0,
16. Jukic', D., Jukic, V.D., (2014) "Investigating Relationships Between Rainfall And Karst Spring Discharge By Higher-Order Partial Correlation Functions" *Journal Of Hydrology* 530 (2015) 24–36.
17. 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
18. Barberá, 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, University Of Málaga (Cehiuma)*, 29071 Málaga, Spain
19. Tang, R., Shu, L., Lu, C., Zhang, C., Fan, J., And Appiah-Adjei, E. (2015). "Laboratory Analog Analysis Of Spring Recession Curve In A Karst Aquifer With Fracture And Conduit Domains." *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(Asce)He. 19435584,0001271,06015013.
20. 19435584,0001271,06015013.
21. Bonacci, O., Andric, I., (2016) "Karst Spring Catchment: An Example From Dinaric Karst" *Environ Earth Sci*, Doi 10.1007/S12665-015-4644-8.
22. Bonacci, O., Jukić, D., Ljubenkov, I., (2006) "Definition Of Catchment Area In Karst: Case Of The Rivers Krčić And Krka, Croatia" *Hydrological Sciences Journal*, Journal, 51:4, 682-699, Doi: 10.1623/Hysj.51.4.682
23. 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.

24. Degirmenci, D., Gûnay, G., (1993) “Origin And Catchment Area Of The Olukkôprü Karst Springs” Hydrogeological Processes in Karst Terranes, IAHS Publ. no. 207.
25. Environmental Modeling Research Laboratory, (2002) “Watershed Modeling System”
26. Butscher, C., Huggenberger, P., (2007) “Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach” Journal of Hydrology, 342, 184– 198.
27. Altansukh, O., (2012) “Tuul River and Its Catchment Area Delineation from Satellite Image” Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 2012, 1, 9-23

Abstract:

Vorskharan karst springs with average discharge of $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ is one of the most important springs in the country of Firoozkooch. This spring is located in the village of Vorskharan in the southwest of the Firoozkooch country. This spring is located in the eastern edge of the Garabagh syncline and it has appeared as a result of the operation of one of the branches of the Moshafasham fault that cuts the Garadagh syncline. The spring of aquifer consists of Mesozoic and Cenozoic rock units. In order to evaluate the hydrogeological and hydrochemical characteristics of the spring, the physical and chemical properties of spring water have been measured for 18 months. Studies have shown that the coefficient of variation in physical and chemical properties is relatively small. In addition, the landing curve has a slope and its discharge coefficient is about 0.003. The decrease of the coefficient of discharge variation, hydraulic conduction, the main ions and the single-slope of the subsurface curve due to the drawn aquifer shape and the long-term presence of snow in the basin of the spring. The presence of a number of sinkholes and blocked pits in the basin of spring indicates that the basic system of flow is not in the diffuse. Due to the relatively high discharge of the spring and the reasons stated above, it can be said that the flow system in the spring basin is of the diffuse-conduit. In this research, the catchment area of spring was drawn as a preliminary. According to the specified area, a catchment area of about 47 square kilometers were estimated for Vorskharan spring. Average annual precipitation for the specified area equals 722 mm, assessed using elevation – precipitation graph of the studied area. Also according to field observations and percentage of soil cover, development of solutional spaces, dissolution and other karst morphological features, percent annual recharge in the study area calculated that is equal to %55. Considering the precipitation volume, percent of annually recharge, the annually recharge volume in catchment area was 19 million cubic meters obtained. In addition, the annual discharge volume via annually hydrograph of spring was calculated that is equal to 21 million cubic meters. Annual recharge and discharge volumes were compared that relative error is of about 2.5 percent. This negligible error between annually recharge and discharge volume in the basin represents calculated the catchment area had appropriate precision.

Keywords: Hydrogeological, Hydrogeochemistry, Catchment area, Vorskharan Karstic Spring, recharge



Shahrood University of Technology
Faculty of Earth Sciences
M. Sc. Thesis of Hydrogeology

**Evaluating the hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of
varskharan karst spring, Firouzkouh**

By:

Hossein Ebrahimi

Supervisor:

Gholamhossein Karami

july 2017