

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین
پایان نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی

عنوان پایان نامه:

هیدروژئولوژی کارست و منشأ چشمه تخت سلیمان، تکاب

نگارنده:

علی عباس پور

استاد راهنما:

دکتر رحیم باقری

استاد مشاور:

دکتر مهدی جعفرزاده

تیر ۱۴۰۰

الف

تقدیم به پدر و مادر و برادر و خواهر عزیزم

خدا را بسی شاکرم از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه

درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان

در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا

که این دو وجود پس از پروردگار مایه، هستی‌ام بوده‌اند و دستم را گرفتند و راه رفتن

را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش مخصوص خداوندی است که نعمت بزرگ تعقل و انسانیت را به آدمی ارزانی داشت و همواره انسان را از خوان نعمت‌های بی‌دریغش بهره‌مند ساخت. اینجانب در طول تحصیل از رهنمودهای ارزنده و بی‌دریغ افراد بزرگواری برخوردار بودم که که بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌شائبه ایشان با زبانی قاصر قدردانی نمایم.

در ابتدا استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر رحیم باقری که با صحنه صبر و بزرگواری، اینجانب را مشمول الطاف خود ساختند و تمامی موانع موجود را برایم هموار نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در آخر از زحمات دلسوزانه اساتید بزرگوار و محترم گروه زمین‌شناسی به ویژه جناب آقایان دکتر هادی جعفری و دکتر غلامحسین کرمی و دکتر مهدی جعفرزاده که، همواره از راهنمایی‌های بی‌دریغشان بهره برده‌ام کمال تشکر و قدردانی را دارم. از دوستان و همکلاسی‌های عزیزم که در دوره کارشناسی ارشد افتخار آشنایی با آنها را داشتم و مرا یاری نموده‌اند، قدردانی می‌نمایم.

در پایان از خانواده که همواره مشوق و راهنمای من در تمام مراحل زندگی، و موثر در شوق ادامه تحصیل اینجانب بوده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **علی عباس پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی آب دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **هیدروژئولوژی کارست و منشأ چشمه تخت سلیمان، تکاب تحت راهنمایی دکتر رحیم باقری متعهد می‌شوم.**

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استناد اشاره شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام ((دانشگاه صنعتی شاهرود)) و یا ((Shahrood University of Technology)) به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بودند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

منطقه کوهستانی تخت سلیمان در جنوب شرق استان آذربایجان غربی واقع شده است. وجود سنگ‌های آهکی کارستی و میانگین بارش سالانه نسبتاً بالای منطقه باعث شده است که چشمه‌های کارستی هم‌چون تخت سلیمان، چارطاق، آلاسقل و چوپلی کانی شفا در منطقه به وجود آید. هدف از انجام این تحقیق، مطالعه‌ی هیدروژئولوژیکی کارست چشمه‌های منطقه تخت سلیمان با استفاده از روش‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروشیمیایی و ایزوتوپی بوده است. مقادیر pH، EC و غلظت یون‌های اصلی و ایزوتوپی چشمه‌ها و دبی چشمه‌ها و همچنین مقادیر ایزوتوپی بارش در ارتفاعات مختلف اندازه‌گیری گردیده است. معادله بدست آمده برای خط بارش منطقه تخت سلیمان بصورت $\delta^2\text{H} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 19.6$ می‌باشد که دارای شیب و عرض از مبدا کمتری نسبت به خط بارش جهانی و مدیترانه به دلیل تبخیر ثانویه است. رابطه ارتفاع-مقدار اکسیژن ۱۸ در این منطقه بصورت $\text{Elevation (m)} = -223.5 \delta^{18}\text{O} + 40.2$ برآورد شده است. نوع جریان در تمام چشمه‌ها بیشتر از نوع افشان می‌باشد. هم‌چنین نتایج بررسی منحنی فرود نشان داد که چشمه تخت سلیمان با دو رژیم خطی فرود مختلف، عمدتاً از طریق ذوب برف به یک سفره تکامل یافته‌ی کارستی تغذیه می‌شود. نتایج حاصل از بررسی‌های ایزوتوپی نشان داد که آب چشمه‌ها از آب‌های جوی نشأت گرفته و بیشتر از طریق برف تغذیه می‌گردند. چشمه‌ها تقریباً دارای منشاء یکسان و تیپ غالب بی‌کربناته-کلسیک و منیزیک می‌باشند. تمامی چشمه‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت اشباع تا فوق اشباع ولی نسبت به ژیپس و هالیت تحت اشباع می‌باشند. میانگین تغذیه سالانه برای حوضه‌های آگیر تخت سلیمان، چوپلی کانی شفا و آلاسقل به ترتیب ۴۴٪، ۴۱٪ و ۳۹٪ تعیین شد. حوضه آگیر چشمه تخت سلیمان با استفاده از نتایج بدست آمده و بررسی عوارض کارستی مختلف مشخص گردید.

کلمات کلیدی: منحنی فرود، توسعه کارست، حوضه آگیر، هیدروژئوشیمیایی، ایزوتوپی، GIS، آذربایجان غربی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- بیان مسأله و هدف انجام تحقیق	۲
۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه	۲
۳-۱- آب و هوای منطقه	۴
۳-۱-۱- ضریب اقلیمی دمارتن	۷
۴-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه	۸
۵-۱- چینه‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه	۸
۵-۱-۱- سازند دگرگون شده کهر	۸
۵-۱-۲- سازند سلطانیه	۹
۵-۱-۳- سازند میلا	۹
۵-۱-۴- سازند لالون	۱۰
۵-۱-۵- سازند زاگون	۱۰
۵-۱-۶- سازند قرمز پایینی	۱۱
۵-۱-۷- سازند قم	۱۲
۵-۱-۸- سازند قرمز بالایی	۱۲
۵-۱-۹- سازند قره‌داش	۱۳
۶-۱- زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک	۱۳
۶-۱-۱- گسل چهارطاق	۱۳
۶-۱-۲- گسل ماه‌نشان	۱۴
۶-۱-۳- گسل انگوران	۱۴
۶-۱-۴- گسل قره‌ناز	۱۵
۶-۱-۵- گسل لعل‌کان	۱۶

۱۶	۱-۶-۶- گسل زندان سلیمان.....
۱۷	۱-۶-۷- گسل امیرآباد.....
۱۷	۱-۶-۸- گسل کاکا.....
۱۸	۱-۶-۹- گسل شیخ لر.....
۱۸	۱-۶-۱۰- گسل بلقیس.....
۱۹	۱-۷- چین خوردگی ها.....
۲۰	۱-۸- فاز کوهزایی منطقه.....
۲۰	۱-۸-۱- فاز کوهزایی کاتانگایی.....
۲۰	۱-۸-۲- فاز کوهزایی لارامید.....
۲۱	۱-۹- ژئومورفولوژی منطقه ی مورد مطالعه.....
۲۱	۱-۱۰- هیدروولوژی منطقه ی مورد مطالعه.....
۲۳	فصل دوم:مروری بر مطالعات پیشین.....
۲۴	۲-۱- مقدمه.....
۲۴	۲-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی چشمه های کارستی.....
۲۶	۲-۳- تعریف و اهمیت کارست.....
۲۷	۲-۴- چشمه های کارستی.....
۲۷	۲-۵- طبقه بندی چشمه های کارستی.....
۲۸	۲-۵-۱- طبقه بندی چشمه ها براساس خصوصیات هیدروژئولوژیکی.....
۲۸	۲-۵-۲- طبقه بندی چشمه ها براساس هیدروگراف جریان خروجی.....
۲۹	۲-۵-۳- طبقه بندی چشمه ها براساس منشأ آب.....
۲۹	۲-۵-۴- طبقه بندی چشمه ها براساس شرایط زمین شناسی و ساختاری.....
۲۹	۲-۶- ارتباط تکتونیک با کارست.....
۳۰	۲-۷- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه های کارستی.....
۳۳	۲-۷-۱- تغییرات آب دهی.....

۳۳.....	۲-۷-۲- تغییرات دمای آب.....
۳۴.....	۳-۷-۲- تغییرات هدایت الکتریکی.....
۳۵.....	۴-۷-۲- تغییرات غلظت یونی.....
۳۶.....	۸-۲- برآورد میزان تغذیه در چشمه‌های کارستی.....
۳۷.....	۹-۲- عوامل مؤثر بر توسعه کارست.....
۳۸.....	۱-۹-۲- بارش.....
۳۸.....	۲-۹-۲- دما.....
۳۹.....	۳-۹-۲- فشار گاز دی اکسید کربن.....
۳۹.....	۴-۹-۲- لیتولوژی.....
۴۰.....	۵-۹-۲- چینه‌شناسی.....
۴۱.....	۶-۹-۲- عوامل تکتونیکی.....
۴۳.....	۷-۹-۲- توپوگرافی.....
۴۳.....	۸-۹-۲- پوشش خاک و پوشش گیاهی.....
۴۴.....	۹-۹-۲- آبراهه.....
۴۵.....	۲-۱۰- تعیین حوضه آبرگیر در چشمه‌های کارستی.....
۴۷.....	۱۱-۲- هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی.....
۴۹.....	۱۲-۲- کاربرد ایزوتوپ پایدار اکسیژن و هیدروژن در مطالعات سیستم‌های کارستی.....
۵۳.....	فصل سوم: مواد و روش‌ها.....
۵۴.....	۱-۳- جمع‌آوری آمار و اطلاعات.....
۵۵.....	۲-۳- بازدیدهای صحرایی.....
۵۵.....	۳-۳- نمونه‌برداری از چشمه‌ها.....
۵۶.....	۴-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه‌ها.....
۵۶.....	۱-۴-۳- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی.....
۵۶.....	۲-۴-۳- اندازه‌گیری pH.....

۵-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه	۵۶
۳-۵-۱- اندازه‌گیری آنیون‌ها	۵۷
۳-۵-۲- اندازه‌گیری کاتیون‌ها	۵۸
۳-۵-۳- محاسبه درصد خطای آزمایش	۵۹
۳-۵-۴- سختی کل (Total Hardness)	۵۹
۳-۵-۵- کل مواد جامد محلول (TDS)	۶۰
۳-۶- محاسبه‌ی ضرایب اشباع	۶۰
۳-۷- نمودارهای ترکیبی	۶۰
۳-۸- تعیین مساحت حوضه آبریز چشمه‌های تخت سلیمان	۶۰
۳-۹- آنالیز ایزوتوپی	۶۱
۳-۱۰- استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تعیین میزان تغذیه	۶۱
۳-۱۰-۱- تهیه لایه‌های اطلاعاتی	۶۲
۳-۱۰-۲- طبقه‌بندی لایه‌های اطلاعاتی	۶۲
۳-۱۰-۳- امتیاز دهی لایه‌های اطلاعاتی	۶۲
۳-۱۰-۴- هم‌پوشانی و تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه معیار	۶۳
۳-۱۰-۵- وزن‌دهی	۶۳
فصل چهارم: بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های تخت سلیمان	۶۵
مقدمه:	۶۶
۴-۱- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه	۶۶
۴-۲- pH	۶۷
۴-۳- هدایت الکتریکی (EC)	۶۸
۴-۴- کل مواد جامد محلول TDS	۶۹
۴-۵- سختی کل (TH)	۶۹
۴-۶- نمودار پایپر (piper)	۷۰

- ۷-۴- نمودار استیف (Stiff)..... ۷۱
- ۸-۴- نمودار شولر (Schoeller)..... ۷۳
- ۹-۴- ارتباط هدایت الکتریکی با سایر یونها..... ۷۴
- ۱۰-۴- شاخص اشباع..... ۷۷
- ۱۱-۴- خصوصیات هیدروژنولوژیکی چشمه‌های کارستی منطقه..... ۷۸
- ۱-۱۱-۴ چشمه کارستی تخت سلیمان (Sp1)..... ۷۸
- ۱-۱-۱۱-۴ بررسی تغییرات زمانی دبی در چشمه تخت سلیمان..... ۷۹
- ۲-۱-۱۱-۴ تحلیل منحنی فرود و محاسبه‌ی ضرایب فرود چشمه تخت سلیمان..... ۸۱
- ۱-۲-۱۱-۴ تغییرات دبی چشمه کارستی آلاسقل..... ۸۴
- ۲-۲-۱۱-۴ تحلیل منحنی فرود چشمه آلاسقل..... ۸۵
- ۱-۳-۱۱-۴ تغییرات دبی چشمه کارستی چوپلی کانی شفا..... ۸۶
- ۲-۳-۱۱-۴ تحلیل منحنی فرود چشمه چوپلی کانی شفا..... ۸۷
- ۱۲-۴- خصوصیات ایزوتوپی چشمه‌های منطقه جهت تعیین منشا و ارتفاع تغذیه..... ۸۸
- ۱-۱۲-۴ ترکیب ایزوتوپی بارش..... ۸۹
- ۲-۱۲-۴ بررسی خصوصیات ایزوتوپی چشمه‌ها و تعیین ارتفاع تغذیه..... ۹۲
- ۱۳-۴- تعیین مساحت حوضه آگیر در چشمه‌های کارستی مورد مطالعه..... ۹۴
- ۱۴-۴- تهیه لایه‌های اطلاعاتی برای تعیین درصد تغذیه..... ۹۵
- الف- لایه لیتولوژی..... ۹۵
- ب- لایه مقدار شیب..... ۹۶
- ج- لایه جهت شیب توپوگرافی..... ۹۷
- د- لایه تراکم خطواره‌ها..... ۹۹
- ه- لایه تراکم آبراهه‌ها..... ۱۰۰
- و- لایه بارش..... ۱۰۱
- ز- لایه عوارض کارستی منطقه..... ۱۰۲

- ۱۰۳..... ر- لایه پوشش گیاهی منطقه
- ۱۵-۴..... هم مقیاس سازی و وزن دهی به لایه های اطلاعاتی
- ۱۶-۴..... تعیین مقدار تغذیه منطقه
- ۱۷-۴..... ارزیابی کلی بیلان هیدروژئولوژیکی منطقه کارستی تخت سلیمان
- ۱۸-۴..... تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی تخت سلیمان
- ۱۱۰..... ۱-۱۸-۴ تعیین حوضه آبرگیر چشمه تخت سلیمان
- ۱۱۳..... ۲-۱۸-۴ تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی آلاسقل
- ۱۱۵..... ۳-۱۸-۴ تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی چوپلی کانی شفا
- ۱۱۸..... ۴-۱۹- مدل شماتیکی هیدروژئولوژیکی چشمه تخت سلیمان
- ۱۱۹..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها
- ۱۲۰..... ۵-۱- نتیجه گیری
- ۱۲۰..... ۵-۱-۱- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدرژئوشیمیایی چشمه های کارستی
- ۱۲۱..... ۵-۱-۲- برآورد تغذیه سالانه در حوضه کارستی تخت سلیمان
- ۱۲۱..... ۵-۱-۳- تعیین حوضه آبرگیر چشمه ها
- ۱۲۲..... ۵-۲- نتایج حاصل از مطالعات ایزوتوپی
- ۱۲۲..... ۵-۳- پیشنهادها
- ۱۲۳..... منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان)..... ۳
- شکل ۲-۱ نمودار امپرومتریک ایستگاه زره‌شوران..... ۶
- شکل ۳-۱ نمودار امپرومتریک ایستگاه آلاسقل..... ۶
- شکل ۱-۴ میانگین مقادیر PH در چشمه‌های منطقه..... ۶۷
- شکل ۲-۴ میانگین مقادیر EC در چشمه‌های منطقه..... ۶۸
- شکل ۳-۴ نمودار پایپر چشمه‌های مورد مطالعه منطقه..... ۷۱
- شکل ۴-۴ نمودار استیف مربوط به چشمه‌های مورد مطالعه..... ۷۳
- شکل ۵-۴ نمودار شولر چشمه‌های منطقه مورد مطالعه..... ۷۴
- شکل ۶-۴ ارتباط هدایت الکتریکی با یون‌های موجود در چشمه‌های مورد مطالعه..... ۷۵
- شکل ۷-۴ رابطه بین کلسیم با بی‌کربنات در نمونه‌های آب چشمه‌ها..... ۷۶
- شکل ۸-۴ رابطه بین منیزیم با بی‌کربنات در نمونه‌های آب چشمه‌ها..... ۷۶
- شکل ۹-۴ شاخص‌های اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه..... ۷۷
- شکل ۱۰-۴ خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه..... ۷۸
- شکل ۱۱-۴ نمایی از کوه بلقیس..... ۷۹
- شکل ۱۲-۴ نمایی از چشمه کارستی تخت سلیمان..... ۸۰
- شکل ۱۳-۴ هیدروگراف چشمه تخت سلیمان در سال آبی ۹۴-۹۵..... ۸۰
- شکل ۱۴-۴ منحنی فرود چشمه کارستی تخت سلیمان..... ۸۳
- شکل ۱۵-۴ هیدروگراف چشمه آلاسقل در سال آبی ۹۴-۹۵..... ۸۴

- شکل ۴-۱۶ منحنی فروکش چشمه کارستی آلاسقل..... ۸۵
- شکل ۴-۱۷ نمایی از چشمه کارستی چوپلی کانی شفا..... ۸۶
- شکل ۴-۱۸ هیدروگراف چشمه چوپلی کانی شفا..... ۸۷
- شکل ۴-۱۹ منحنی فروکش چشمه کارستی چوپلی کانی شفا..... ۸۷
- شکل ۴-۲۰ مقادیر ایزوتوپی بارش به همراه نمونه‌های چشمه‌های منطقه و خط بارش جهانی و مدیترانه‌ای... ۹۰
- شکل ۴-۲۱ رابطه اکسیژن ۱۸ با ارتفاع در نمونه‌های بارش منطقه..... ۹۴
- شکل ۴-۲۲ لایه لیتولوژی منطقه مورد مطالعه..... ۹۶
- شکل ۴-۲۳ لایه شیب منطقه مورد مطالعه (واحد شیب به درجه است)..... ۹۷
- شکل ۴-۲۴ لایه جهت شیب منطقه..... ۹۸
- شکل ۴-۲۵ لایه خطواره‌های منطقه..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۶ لایه آبراهه‌های منطقه..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۷ لایه بارش در منطقه..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۸ لایه عوارض کارستی در منطقه..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۹ لایه پوشش گیاهی در منطقه..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۰ نقشه نهایی تغذیه منطقه..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۱ موقعیت حوضه آبگیر چشمه‌های تخت سلیمان، آلاسقل و چوپلی کانی شفا در منطقه مورد مطالعه... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۲ موقعیت و میزان تغذیه-حوضه آبگیر..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۳ موقعیت حوضه آبگیر چشمه تخت سلیمان در Google earth..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۴ نقشه زمین‌شناسی حوضه آبگیر چشمه تخت سلیمان..... ۱۱۲
- شکل ۴-۳۵ موقعیت حوضه آبگیر چشمه آلاسقل در Google earth..... ۱۱۴

- شکل ۴-۳۶ نقشه زمین‌شناسی حوضه آبگیر چشمه آلاسقل..... ۱۱۵
- شکل ۴-۳۷ موقعیت حوضه آبگیر چشمه چوپلی کانی شفا در Google earth..... ۱۱۶
- شکل ۴-۳۸ نقشه زمین‌شناسی حوضه آبگیر چشمه چوپلی کانی شفا..... ۱۱۷
- شکل ۴-۳۹ مدل شماتیکی هیدروژئولوژیکی چشمه تخت سلیمان..... ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱	مقادیر بارندگی و دما در ایستگاه‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه.....	۵
جدول ۲-۱	طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن (به نقل از علیزاده ۱۳۸۶).....	۷
جدول ۱-۴	تقسیم‌بندی کیفی نمونه‌های آب بر مبنای مقادیر TDS (Todd,2005).....	۶۹
جدول ۲-۴	طبقه‌بندی کیفی آب‌ها بر اساس سختی کل (Todd, 2005).....	۷۰
جدول ۳-۴	مشخصات پارامترهای هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی تخت سلیمان.....	۸۲
جدول ۴-۴	مشخصات پارامترهای هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی آلاسقل.....	۸۵
جدول ۵-۴	مشخصات پارامترهای هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی چوپلی کانی شفا.....	۸۸
جدول ۶-۴	ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب چشمه‌های تخت سلیمان.....	۹۳
جدول ۷-۴	ارزش‌دهی و وزن‌دهی به لایه‌های مختلف.....	۱۰۵
جدول ۸-۴	درصد تغذیه سالانه محاسبه شده و مساحت هر رده.....	۱۰۸

فصل اول:

مقدمه

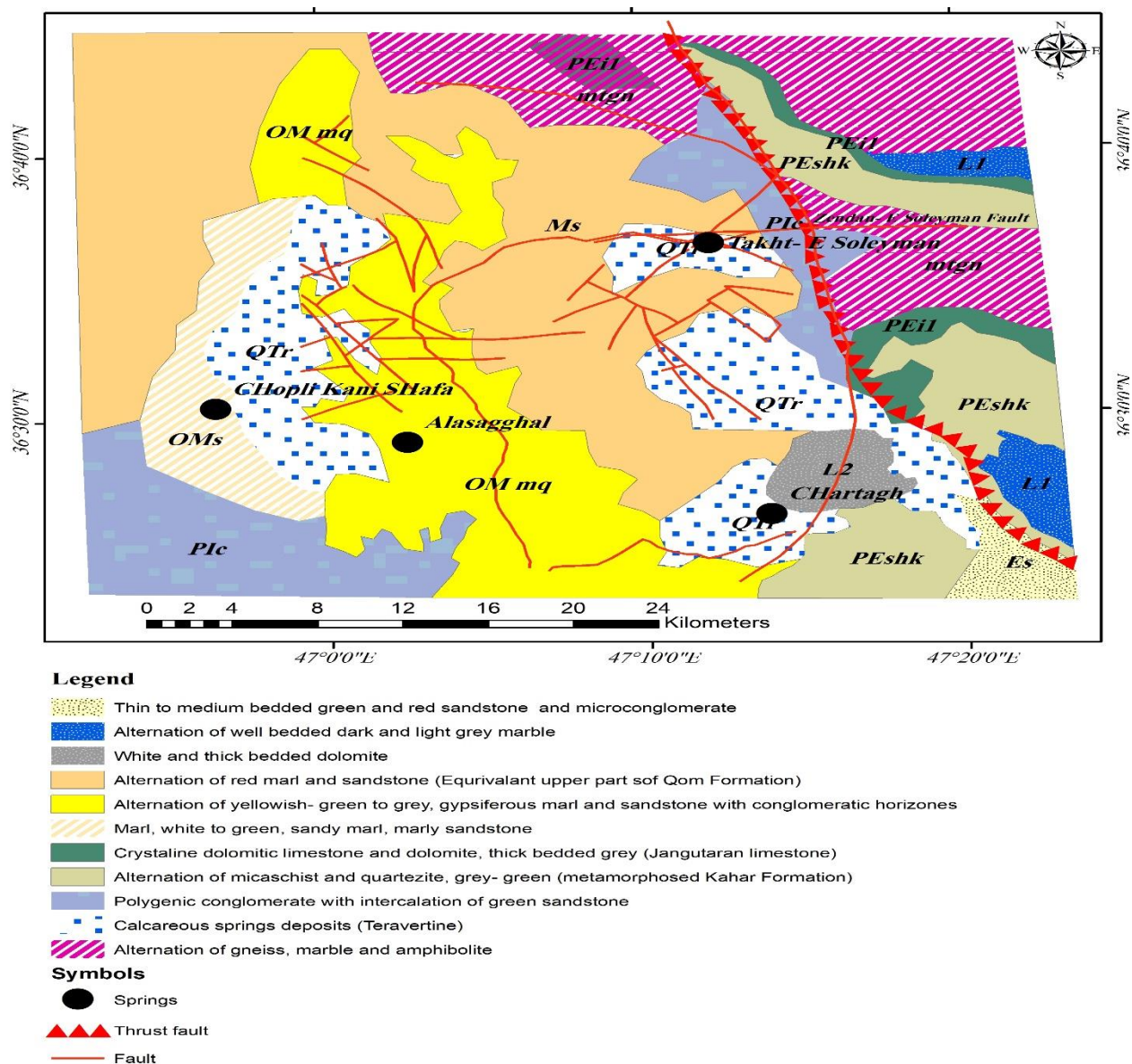
۱-۱- بیان مسأله و هدف انجام تحقیق

در سال‌های اخیر، منابع آب زیرزمینی به علت افزایش جمعیت، رشد صنعتی کشورها و کمبود منابع آب‌های سطحی، به منبعی بسیار مهم و با ارزش تبدیل شده است، به طوری که آب زیرزمینی، منبع اصلی تأمین آب بسیاری از شهرها و روستاها به شمار می‌رود. مطالعه‌ی منابع آب به این دلیل که سازندهای کربناته تقریباً ۲۰٪ از سطح کره‌ی زمین را می‌پوشانند و جمعیت قابل توجهی از جهان، آب مورد نیاز خود را از این طریق تأمین می‌کنند، دارای اهمیت زیادی است (Lamoreaux 1991). چشمه‌های کارستی، تنها محلی هستند که می‌توان با کمک مدل‌های هیدروژئوشیمیایی و هیدروگراف جریان چشمه‌ها، اطلاعاتی از عملکرد کل سیستم کارست در یک ناحیه به دست آورد (Bakalowicz 2005). پاسخ هیدروژئوشیمیایی و هیدرودینامیکی در آبخوان‌های کارستی نیز به شرایط جریان در این آبخوان‌ها بستگی دارد. در منطقه تخت سلیمان (شمال تکاب)، چندین چشمه کارستی وجود دارد. چشمه اصلی از آهک‌های اطراف منشأ گرفته و بصورت سیفونی از وسط حوضچه (غمپ) واقع در عمارت تخت سلیمان تخلیه می‌گردد. این حوضچه بوسیله رسوبات تراورتنی حاصل از تخلیه چشمه درست شده است. با وجود این رسوبات و همچنین قدمت عمارت تخت سلیمان، احتمالاً سن این چشمه زیاد باشد. از آب این چشمه جهت کشاورزی و شرب استفاده می‌شود. سوال اصلی در این منطقه در مورد منشأ و مکانیسم جریان این چشمه قدیمی می‌باشد. از آن جایی که تاکنون مطالعه جامعی پیرامون این چشمه‌ها صورت نگرفته است از این رو هدف از انجام این تحقیق، مطالعه‌ی خصوصیات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی کارست و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های تخت سلیمان جهت تعیین حوضه‌ی آبریز و منشأ آن‌ها می‌باشند.

۱-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب شرقی استان آذربایجان غربی در ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان تکاب واقع شده

است. منطقه مورد مطالعه در طول‌های جغرافیایی ۴۷° و ۱۹' شرقی و ۴۶° و ۳' غربی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶° و ۴۵' شمالی و ۲۱' و ۳۶° جنوبی واقع شده است. ارتفاع کوه‌های منطقه از ۲۰۰۰ تا ۳۳۳۰ متر است که متوسط آن ۲۲۰۰ تا ۲۳۰۰ می‌باشد. محدوده مورد مطالعه بین دو زون آذربایجان و البرز قرار گرفته است. شکل (۱-۱) موقعیت زمین‌شناسی منطقه و راه‌های دسترسی به آن را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان)

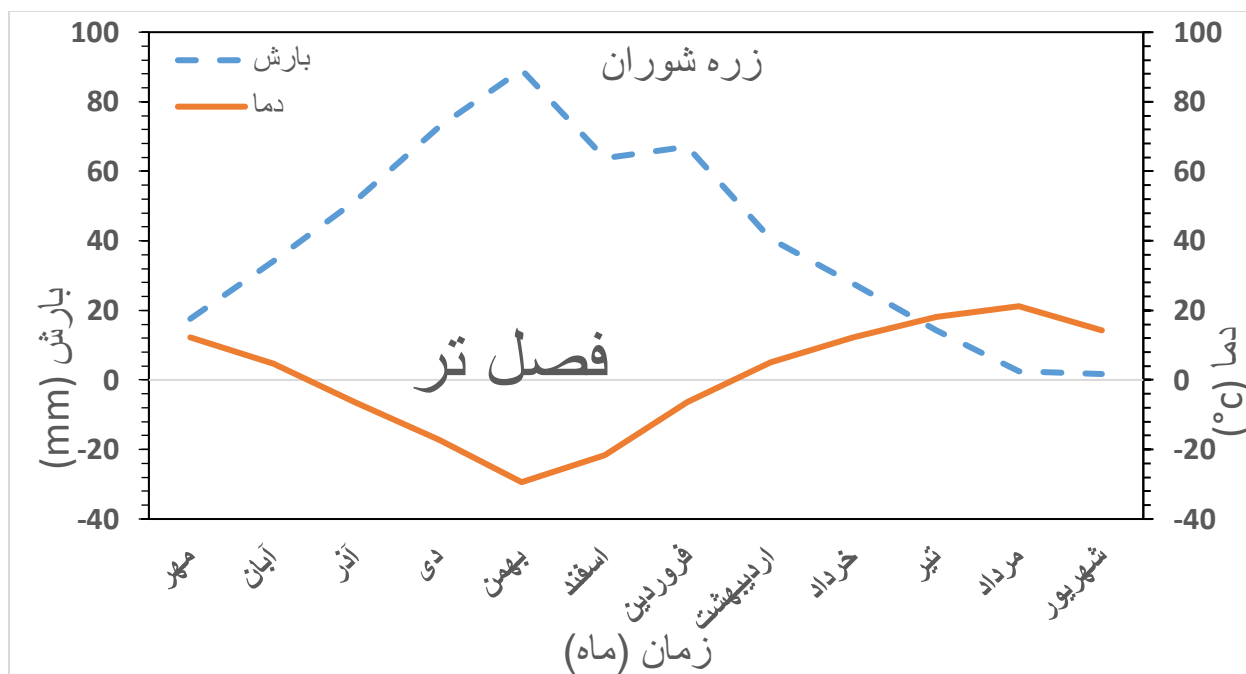
۱-۳- آب و هوای منطقه

برای بررسی آب و هوای منطقه اقدام به جمع‌آوری پارامترهای هواشناسی از ایستگاه‌های باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی ایستگاه زره‌شوران، آلاسقل و ایستگاه رحیم آباد شده است. با توجه به داده‌های ایستگاه هواشناسی زره‌شوران، میزان بارندگی سالیانه در منطقه حدوداً ۹۵۷ میلی‌متر بوده که بیش‌ترین میزان بارندگی ماهانه مربوط به بهمن ماه برابر ۱۴۰ میلی‌متر و کم‌ترین بارندگی مربوط به شهریور ماه برابر با ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. متوسط درجه حرارت سالیانه در منطقه مورد مطالعه تقریباً ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. بیش‌ترین درجه حرارت مربوط به مرداد ماه با متوسط ۲۳ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین مقدار آن مربوط به بهمن ماه با متوسط ۲۰- درجه سانتی‌گراد است. برای محاسبه میزان متوسط بارندگی در منطقه مورد مطالعه از ایستگاه‌های مجاور منطقه‌ی مورد مطالعه با توجه به شباهت به وضعیت آب و هوایی و نزدیکی به منطقه انتخاب شده‌اند. مشخصات ایستگاه‌های مذکور جدول ۱-۱ ارائه شده است.

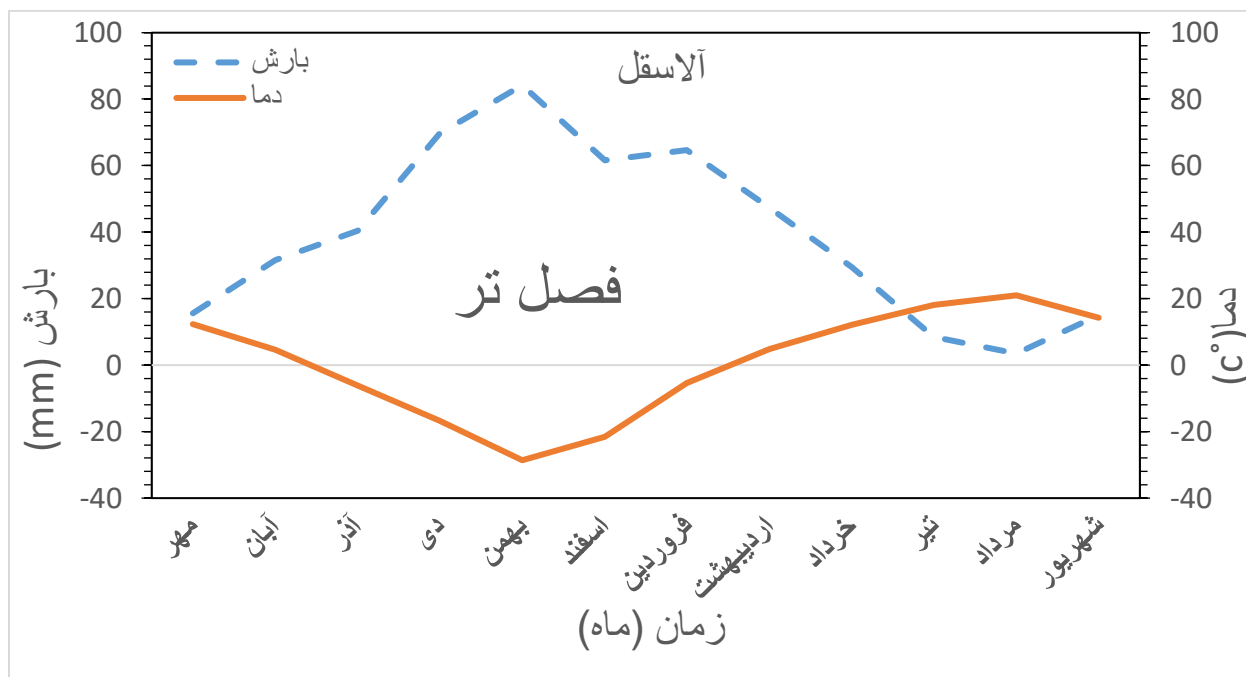
شکل‌های ۱-۲ و ۱-۳ به ترتیب نمودارهای امبروترمیک (Embrothermic) مربوط به ایستگاه‌های زره‌شوران و آلاسقل را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای امبروترمیک زمان‌هایی که میانگین بارندگی بالاتر از میانگین دما باشد، فصل تر و در غیر این صورت فصل خشک رخ می‌دهد. برطبق نمودار امبروترمیک ایستگاه هواشناسی زره‌شوران فصل تر حدوداً تا اوایل خرداد ماه بوده و بقیه سال، خشک نامیده می‌شود. همچنین برای ایستگاه آلاسقل فصل تر از اوایل مهر ماه تا اواسط خرداد ماه بوده و بقیه سال خشک می‌باشد.

جدول ۱-۱: مقادیر بارندگی و دما در ایستگاه‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه

ایستگاه		زمان (ماه)	
آلاسقل		زره شوران	
دما	بارش	دما	بارش
مهر	۱۲,۴	۱۵,۶	۱۲,۲
آبان	۴,۷	۳۱,۵	۴,۶
آذر	-۶,۲	۴۰,۴	-۶,۵
دی	-۱۶,۸	۶۹,۷	-۱۷,۲
بهمن	-۲۸,۶	۸۴,۲	-۲۹,۴
اسفند	-۲۱,۵	۶۱,۷	-۲۱,۷
فروردین	-۵,۳	۶۴,۷	-۶,۳
اردیبهشت	۴,۹	۴۷,۳	۵
خرداد	۱۲,۲	۲۹,۵	۱۲,۳
تیر	۱۸,۱	۸,۵	۱۸,۱
مرداد	۲۱	۳,۵	۲۱,۲
شهریور	۱۴,۳	۱۵	۱۴,۲
مجموع		۴۷۱,۶	۴۸۲,۲
میانگین	۹,۲	۳۹,۳	۶,۵
حداکثر	۲۱	۸۴,۲	۲۱,۲
حداقل	-۲۸,۶	۳,۵	-۲۹,۴



شکل ۱-۲: نمودار امبرومتریکی ایستگاه زره شوران



شکل ۱-۳: نمودار امبرومتریکی ایستگاه آلاسقل

۱-۳-۱- ضریب اقلیمی دمارتن

از طبقه‌بندی دمارتن، برای تعیین اقلیم منطقه مورد مطالعه نیز استفاده شده است. فرمول پیشنهادی دمارتن برای تعیین اقلیم هر منطقه به شرح زیر است:

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

P: متوسط بارندگی سالیانه بر حسب میلی‌متر

T: متوسط دمای سالیانه بر حسب درجه سانتی‌گراد

I: ضریب خشکی دمارتن

مقدار I نوع اقلیم منطقه را مشخص می‌کند. مقدار I با توجه به فرمول بالا برای داده‌های ایستگاه هواشناسی زره‌شوران و آلاسقل به ترتیب برابر با ۲۹/۸۳ و ۳۲/۵۹ است، که با توجه به جدول (۱-۲) اقلیم منطقه مورد مطالعه در حد مرطوب تعیین می‌گردد.

جدول ۱-۲: طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن (به نقل از علیزاده ۱۳۸۶)

نام اقلیم	محدوده‌ی ضریب خشکی دمارتن
خشک	کوچک‌تر از ۱۰
نیمه خشک	۱۰٫۹-۱۹
مدیترانه‌ای	۲۰٫۹-۲۳
نیمه مرطوب	۲۴٫۹-۲۷
مرطوب	۲۸٫۹-۳۴
بسیار مرطوب	بزرگ‌تر از ۳۵

۱-۴- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب‌شرق استان آذربایجان غربی، در منطقه تخت سلیمان بین دو زون ساختاری آذربایجان و البرز قرار دارد. بیشینه ارتفاع ۳۳۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. پی سنگ منطقه از سنگ‌های پرکامبرین تشکیل شده است از قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه است. این سنگ‌ها اکثراً دگرگونی بوده و عبارتند از: گنیس، آمفیبولیت، میکاشیست و مرمر. واحدهای ترشیاری در تمام منطقه دارای رخساره کم و بیش یکسانی است. مهم‌ترین سازندهای منطقه مورد مطالعه به ترتیب سازند قرمز تحتانی، سازند قم، سازند قرمز فوقانی و گسترده‌ترین مخروط افکنه‌های جوان و تراس‌های کوارترنری می‌باشند.

۱-۵- چینه‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه

براساس اطلاعات چینه‌شناسی، سازندهای موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه از قدیم به جدید شامل: سازند کهر دگرگون شده، سازند سلطانیه، سازند میلا، سازند لالون، سازند زاگون، سازند قرمز پایینی، سازند قم، سازند قرمز بالایی و سازند قره‌داش است.

۱-۵-۱- سازند دگرگون شده کهر

سازند کهر از کهن‌ترین واحدهای سنگی است که این واحد سنگی از پرکامبرین در قسمت باختری برونزاد دارد. سازند کهر بیشتر از ماسه سنگ‌های کوارتزیتی، ماسه سنگ ریز دانه و تیره رنگ دگرگون شده، فیلیت، اسلیت و سنگ آهک‌های دگرگون شده تشکیل شده است. سنگ‌های فیلیت و اسلیت به رنگ سبز هستند و سیریسیت در آن دیده می‌شود. این سنگ‌ها بسیار دانه ریزند و از کوارتز کریپتوکریستالین و کانی‌های سیریسیت ولکریت تشکیل شده‌اند که کمی دارای جهت‌یافتگی هستند. سازند کهر از توسط سنگ‌های رسوبی جوانتر از خود مانند سازند درود با سنگ‌های دونین با سطح تماسی از نوع دگرشیبی زاویه‌دار پوشیده شده و توسط گرانیتهای با

سن پرمین پسین بریده می‌شوند. در مابین سنگ‌های رسوبی سازند کهر لایه‌های سنگ آهکی دگرگون شده و سفید رنگ وجود دارد که دارای بافت دانه‌ای و درشت بلور هستند این مرمرها به سختی خرد شده‌اند و در درز و شکاف‌های آن‌ها کلویت دیده می‌شود که به صورت عدسی در سازند کهر وجود دارند. از نظر لیتولوژی سازند کهر شامل شیل‌های یکنواخت رسی همراه با کمی سربیسیت تا شیل‌های ماسه‌ای میکادار به رنگ خاکستری مایل به سبز هستند. در شیل‌های ذکر شده گاهی انترکلاسیون‌هایی از ماسه سنگ دولومیت زرد قهوه‌ای، آهک شدیداً متبلور و همچنین مواد آتش‌فشانی دیده می‌شود. سازند کهر فاقد فسیل است و روی توده دگرگونی به ضخامت بیش از ۱۰۰۰ متر واقع شده است.

۱-۵-۲ - سازند سلطانیه

رسوبات سازند سلطانیه به سن پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین در حوضه رسوبی البرز به ویژه در جنوب زنجان رخنمون گسترده‌ای دارند. از نظر لیتولوژی این سازند از دولومیت و شیل تشکیل شده و در قسمت‌های شیلی دارای کانه‌زایی فسفات است. افق‌های فسفات سازند سلطانیه گسترش جانبی قابل ملاحظه‌ای دارد و از دیرباز مورد توجه پژوهشگران ایرانی بوده است (زه‌دی و معینی، ۱۳۹۵؛ چشمه‌سری و همکاران، ۱۳۹۱). سازند سلطانیه دربرگیرنده مرز پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین است و از این نظر مورد مطالعه فسیل‌شناسی و ژئوشیمیایی قرار گرفته است. روی بخش‌های کربناته و دولومیتی این سازند که به شدت تحت تأثیر فرایندهای دیاژنزی هم‌چون سیلیسی شدن (گرهک‌ها و نوارهای چرت) و دولومیتی شدن قرار گرفته: مطالعات کمتری انجام شده است.

۱-۵-۳ - سازند میلا

سازند میلا به سن کامبرین پسین تا اردوویسین پیشین در البرز قرار گرفته است. نام این سازند از میلاکوه در

جنوب سمنان گرفته شده است که توسط اشتوکلین شناسایی شده است. این سازند ۵۸۵ متر ضخامت داشته و دارای ۵ بخش است که از پایین به بالا شامل: ۱- دولومیت، مارن، شیل، ۲- آهک متبلور تریلوبیت‌دار، ۳- آهک، مارن و سیلتستون، ۴- سیلتستون، ماسه‌سنگ، آهک گلوکونی‌دار و مارن با فسیل تریلوبیت، ۵- شیل، ماسه‌سنگ و آهک نازک لایه و کوارتزیت است. سازند میلا در برش الگو با یک لایه مارنی زرد رنگ بر روی کوارتزیت رأسی قرار دارد و به صورت ناپیوستگی فرسایشی در زیر سازند جیروود قرار گرفته است و در زیر سازند میلا سازند لالون قرار گرفته است. سازند میلا در البرز، سلطانیه، آذربایجان، کردستان، کبودرآهنگ و بلندی‌های زاگرس و ایران مرکزی گسترش دارد.

۱-۵-۴ - سازند لالون

سازند لالون با سن کامبرین پیشین در البرز واقع شده است. نام این سازند از دره لالون در شمال شرق تهران گرفته شده که توسط (Aserto 1963) شناسایی شده است. ضخامت این سازند ۵۸۲ متر است که شامل شیل‌های قرمز تیره و ماسه‌سنگ‌های کوارتزی قرمز رنگی است که در بالا به یک لایه سفید رنگ ماسه‌سنگی محدود می‌شود که در محیط جزر و مدی تشکیل شده و شروع پیشروی سازند میلا رو نشان می‌دهد. مرز زیرین سازند لالون با سازند زاگون تدریجی و مرز بالایی آن با سازند میلا تند و ناگهانی است. وجود بلورهای نمک در این سازند به ویژه در گنبد‌های نمکی و آثار ترک‌های گلی نشان‌دهنده‌ی محیط کم عمق تا جزر و مدی است. سازند لالون در تمامی البرز، آذربایجان و ایران مرکزی دیده شده و در زاگرس در میان گنبد‌های نمکی و در کوه دینار رخنمون دارد.

۱-۵-۵ - سازند زاگون

سازند زاگون در البرز قرار گرفته و با سن کامبرین پیشین است. نام این سازند از روستای زاگون در شمال شرق

تهران گرفته شده که توسط (Asert1963) معرفی شده است. ضخامت سازند زاگون ۴۵۳ متر بوده و شامل تناوبی از شیل‌های آهک‌دار و ماسه‌سنگ‌های میکادار و سنگ‌هایی به رنگ ارغوانی است. سازند زاگون در البرز، آذربایجان، مهاباد، کبودرآهنگ و تکاب رخنمون دارد. در شمال سمنان، شهمیرزاد، دامغان، کاشمر و جنوب سبزوار رخنمون دارد ولی گسترش این سازند در ایران مرکزی محدودتر از البرز است. در زاگرس در کوه دینار، کوه سبز، کوه لاجین و کوه گر گسترش دارد. بخش زیرین سازند زاگون به دلیل داشتن گل‌سنگ و لای‌سنگ سرخ رنگ، ترک‌های گلی و قالب بلورهای تبخیری در یک محیط قاره‌ای خشک و به گمان قوی در یک محیط پلایایی انباشته شده است. سنگ‌های بخش بالایی این سازند معرف محیط پیچان‌رودی است.

۱-۵-۶- سازند قرمز پایینی

سازند قرمز پایینی با سن الیگوسن در ایران مرکزی واقع شده است. این سازند توسط (گانسر) نام‌گذاری شده است. سازند قرمز پایینی شامل رسوبات قرمز رنگی است که بین لایه‌های آتشفشانی - رسوبی ائوسن و لایه‌های دریایی الیگو - میوسن (سازند قم) قرار دارد. وجه تمایز سازند قرمز پایینی از سازند قرمز بالایی در این است که مستقیماً در مرز زیرین سازند قم در ناحیه قم و هر جای دیگری از حوضه ترسیر ایران مرکزی رخنمون دارد. در قم، رسوبات سازند قرمز پایینی، در مرکز تاقدیس‌ها دیده می‌شود و تناوبی از مارن‌های رس‌دار رنگارنگ است که در آن لایه‌های گچ، شیل، سیلتستون و ماسه‌سنگ هماتیته هم وجود دارد. در بخش انتهایی سازند، لایه‌های آتشفشانی با ضخامت‌های متفاوت هم دیده می‌شود. از نظر لیتولوژی سازند قرمز پایینی شامل شیل، سیلت، گل‌سنگ، ماسه‌سنگ، لایه‌های ژئوپس به همراه نمک، سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های پیروکلاستیک الیگوسن است که ضخامت آن بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بوده و بیشترین ضخامت آن در حوضه قم است. منبع تغذیه نمک گنبد‌های نمکی سمنان سازندهای ائوسن - الیگوسن قرمز پایینی و قرمز بالایی است. نهشته‌های سازند قرمز پایینی عامل پدید آمدن گنبد‌های نمکی در گرمسار و ایوانکی در ائوسن - الیگوسن است.

۱-۵-۷- سازند قم

سازند قم با سن الیگوسن - میوسن در ایران مرکزی قرار گرفته است. برای مقطع نمونه این سازند نقطه خاصی وجود ندارد ولی عموماً ناحیه نمونه آن را در کوه‌های قم مانند کوه میل، دو چاه، دو برادر، نرداقی، خورآباد و شوراب که این سازند در آن برونزاد دارد در نظر گرفته می‌شود. ضخامت سازند قم ۱۲۰۰ متر است و از نظر سنگ‌شناسی به ۹ عضو تقسیم می‌شود. سن سازند قم الیگوسن میانی - پایانی تا میوسن پیشین است و آن را معادل سازند آسماری در زاگرس می‌دانند. سازند قم با رخساره سنگی محیط دریایی مابین دو سازند تخریبی قاره‌ای قرمز پایینی و قرمز بالایی قرار دارد. شمالی‌ترین بیرون زدگی‌های سازند قم در مره کوه در ارتفاعات البرز است و ضخامت اندکی دارد. در شمال غرب در ساوه و همدان ضخامت این سازند ۵۰۰ تا ۲۳۰۰ متر است. سازند قم در ناحیه تکاب، میانه و پیرامون دریاچه ارومیه نیز دیده می‌شود.

۱-۵-۸- سازند قرمز بالایی

سازند قرمز بالایی با سن میوسن در ایران مرکزی واقع شده است. نام این سازند توسط زمین‌شناسان شرکت ملی نفت ایران در سال ۱۳۵۰ رایج شد. سازند قرمز بالایی شامل لایه‌های ضخیم قرمز رنگ گچ‌دار و نمک‌دار است که در ایران مرکزی و شمال غرب ایران گسترش دارد. سازند قرمز بالایی از نظر سنگ‌شناسی شبیه سازند قرمز پایینی است. رسوبات سازند قرمز بالایی در محیط قاره‌ای بیابانی و کولابی ته‌نشین شده است. ضخامت این سازند ۶۰۰۰ متر است و ضخامت لایه‌های تبخیری زیرین نسبتاً زیاد است و لایه‌های متعددی وجود دارد که با رس‌های نمک‌دار و مارن‌های سبز رنگ حالت میان‌لایه‌ای دارد. وسعت این سازند نشان می‌دهد که بسیاری از تپه ماهورهای قرمز رنگی که با رسوبات تبخیری آغشته باشد جزئی این سازند است که در برخی نقاط در زیر رسوبات کویری، ابرفتی یا بادی کوارترنر، یا کنگلومرای پلیوسن پنهان مانده است. بسیاری از قنات‌ها و چاه‌هایی

که در این رسوبات حفر شده‌اند، آب شور دارند که ناشی از شستن املاح این رسوبات است. نهشته‌های نمکی در گنبد‌های نمکی جنوب سمنان و شرق تهران دارای لایه‌های متناوب نمک، ژئوپس، رس‌های نمکی قرمز رنگ و مارن‌های سبز می‌باشد که بخش پایینی سازند قرمز بالایی را در کویر بزرگ و ایران مرکزی مشخص می‌کنند.

۱-۵-۹ - سازند قره‌داش

سازند قره‌داش متشکل از توف‌ها و گدازه‌های ریولیتی است که در آن لایه‌هایی از دولومیت‌های چرت‌دار دیده می‌شود. سن سازند قره‌داش به گرانیات دوران یعنی معادل خروجی دوران نسبت می‌دهند. سازند قره‌داش به صورت هم‌شیب بر روی سازند کهر قرار دارد.

۱-۶-۱ - زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک

منطقه مورد مطالعه در محل تلاقی زون‌های سنندج- سیرجان - ایران مرکزی و البرز آذربایجان واقع شده است. عناصر ساختاری موجود در منطقه شامل گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها است ولی سیمای اصلی ساختاری را در سنگ‌های پرکامبرین گسل‌ها و در سنگ‌های سنوزوئیک چین‌خوردگی به وجود آورده است. امتداد گسل‌ها در بخش شمال و غرب بیشتر شمالی- جنوبی بوده و در بخش جنوب چین‌خوردگی‌ها در امتداد زاگرس قرار دارند. این منطقه به لحاظ تکتونیکی تحت تأثیر فازهای کوه‌زایی گوناگونی قرار گرفته است. در ادامه به بررسی مهم‌ترین عناصر ساختاری منطقه پرداخته می‌شود.

۱-۶-۱-۱ - گسل چهارطاق

این گسل دارای امتداد شمال غربی- جنوب شرقی است. اثر این گسل به سوی شمال غرب روستای تازه‌کند

پیگیری کرد؛ که شیب آن زیاد و تقریباً قائم است و سپس در زیر رسوبات جوان و تراورتن‌ها پوشیده می‌شود. به سمت جنوب شرق شیب گسل کاهش می‌یابد و در نزدیکی روستای چهارطاق به ۶۰ درجه می‌رسد (Yousefi and Friedberg, 1978). در انتهای جنوب شرقی امتداد گسل چهارطاق تغییر می‌کند و شرقی-غربی می‌شود. البته این احتمال وجود دارد که این بخش شرقی-غربی، یک گسل وارون در پایانه فشاری گسل چهارطاق باشد که در اثر حرکت راست‌بر این گسل ایجاد شده است.

۱-۶-۲- گسل ماه‌نشان

این گسل دارای راستای شمال غربی است که از بخش‌های مختلفی ایجاد شده است؛ گسل گونی، گسل مقانلو و گسل کهرئز گسل گونی یک گسل راندگی است که موجب راندگی مارن‌های میوسن، سازند کهر، آهک‌های روته و کنگلومرای الیگوسن روی نهشته‌های آبرفتی کوارترنری شده است، گسل مقانلو سبب رانده شدن مارن‌های میوسن روی واحد کوارترنری، و گسل کهرئز موجب راندگی مارن‌های میوسن و گرانیت پورفیری سنوزوئیک روی نهشته‌های کوارترنری شده است (شیخ الاسلامی، ۱۳۹۲). سازوکار گسل ماه‌نشان، راندگی بوده و موجب راندگی سازند کهر روی نهشته‌های آبرفتی پلیوسن-کوارترنری شده است (احمدی ترکمانی و قاسمی، ۱۳۹۳).

۱-۶-۳- گسل انگوران

این گسل با راستای شمال غربی در شمال روستای انگوران قرار دارد. شیب گسل انگوران به سمت شمال شرقی است و سنگ‌های مجموعه پی سنگی در فرادیواره این گسل رخنمون یافته‌اند. گسل انگوران تا حدود ۲۱ کیلومتری پوسته زیرین نفوذ کرده و همه توالی فانروزوئیک و بخشی از پی سنگ پرکامبرین در پوسته زیرین را دچار راندگی می‌کند و از یک پهنه برش نرم در اعماق سرچشمه می‌گیرد (احمدی ترکمانی و قاسمی، ۱۳۹۳). گسل انگوران از الیگوسن فعال بوده که علت آن نهشته‌های پیرامون این گسل است. تاقدیس انگوران در

فرادیواره گسل انگوران قرار دارد و یال غربی آن توسط گسل انگوران بریده شده است. در محل انتهایی جنوب شرقی گسل انگوران محور این تاق‌دیس خمیده و شرقی- غربی می‌شود. احتمالاً این خمیدگی به علت وجود حرکت راست‌الغز راست‌بر گسل است. در نهایت سازوکار گسل انگوران راندگی با مولفه راست‌الغز راست‌بر در نظر گرفته شده است.

۱-۶-۴- گسل قره‌ناز

این گسل امتدادی متغیر و انتهایی جنوب شرقی آن امتداد شمال غربی دارد؛ ولی به سمت شمال غرب چرخیده و شرقی- غربی می‌شود؛ در نزدیکی گسل چهارطاق نیز تغییراتی در امتداد آن دیده می‌شود و تحت تأثیر حرکات راست‌الغز راست‌بر گسل چهارطاق در آن خمش‌هایی ایجاد شده است. در محل روستای قره‌ناز و قوزولو که در بخش میانی این گسل قرار دارند، در اثر این گسل، راندگی شیست‌های پی‌سنگ دگرگونی را روی سنگ‌های آتشفشانی دگرسان و توف‌های الیگومیوسن قابل مشاهده است. هم‌چنین به سمت انتهایی جنوب شرقی آن در جنوب شرق روستای آق‌بلاغ سردار به راحتی راندگی نهشته‌های الیگومیوسن رو رسوبات ماسه‌سنگی و مارن‌های قرمز رنگ میوسن در اثر این گسل قابل مشاهده است. در جنوب شرقی روستای قره‌ناز در فرودیواره گسل قره‌ناز چین‌های برشی دیده می‌شوند که به دلیل خمش چپ پله‌ای است که در این بخش در مسیر گسل قره‌ناز وجود دارد. این چین‌خوردگی‌ها نشان دهنده این است که این گسل راندگی، امتداد لغز راست‌بر دارد، البته به نظر می‌رسد که به سمت شمال غرب که امتداد این گسل شرقی- غربی می‌شود امتداد لغز آن کاهش پیدا می‌کند و بیشتر به صورت راندگی عمل می‌کند.

۱-۶-۵- گسل لعل‌کان

این گسل تقریباً دارای امتداد شرقی- غربی است و به سمت گسل چهارطاق تحت تأثیر حرکات گسلی راستالغز راست‌بر، جابه‌جایی و خمیدگی‌هایی در آن ایجاد شده است. این گسل در بخش شرقی موجب راندگی واحد دگرگونی پی‌سنگی رو واحد الیگومیوسن شده است و به سمت غرب در واحد دگرگونی پی‌سنگی موجب راندگی بخش‌های گنیسی قدیمی روی شیستی جوان‌تر شده است. بلندترین قله منطقه قله کوه بلقیس است در فرادیواره آن، این راندگی قرار دارد. به سمت غرب تحت تأثیر گسل راستالغز راست‌بر بلقیس که موازی با گسل چهارطاق است، جابه‌جایی راست‌بر این گسل اتفاق افتاده است.

۱-۶-۶- گسل زندان سلیمان

گسل زندان سلیمان یک گسل شرقی- غربی بزرگ است که در فرودیواره آن گسل چهارطاق ادامه دارد و شاید دلیل آن وجود چشمه‌های تراورتن‌ساز بزرگ در امتداد این گسل در فرودیواره گسل چهارطاق باشد، که آن را تا فرودیواره گسل در نظر گرفته‌اند، ولی در بررسی‌های انجام شده در منطقه مشخص شده که این گسل به سمت باختر تحت تأثیر گسل امتداد لغز راست‌بر بلقیس، جابه‌جا شده است و امتداد آن تغییر می‌کند و آن را نمی‌توان به سمت غرب در فرودیواره گسل چهارطاق ادامه داد و با گسل ایجاد کننده چشمه‌های تراورتن‌ساز فرودیواره چهارطاق یکی در نظر گرفت. همچنین با بررسی دقیق‌تر امتداد چشمه‌های بزرگ تراورتن‌ساز در فرودیواره گسل چهارطاق می‌توان مشخص کرد که این چشمه‌ها در یک امتداد شمال غربی- جنوب شرقی قرار گرفته‌اند که متفاوت‌تر از گسل زندان سلیمان شرقی- غربی است. در مورد سازوکار این گسل نظرات گوناگونی وجود دارد؛ برای نمونه (Daliran et al, 2013) با توجه به شواهد راندگی این گسل در فرادیواره گسل چهارطاق، در نیمرخ ساختاری خودشان گسل زندان سلیمان را به صورت راندگی نشان داده‌اند ولی به دلیل اینکه در فرودیواره گسل چهارطاق در امتداد آن چشمه‌های فعال و بازشدگی دیده شده است یک گسل کششی در نظر گرفته‌اند که در

راستای آن چشمه‌های آب گرم فعال وجود دارد. در بررسی این گسل در شمال روستای امیرآباد حرکت وارون این گسل و راندگی مجموعه دگرگونی پی‌سنگی روی واحد توف الیگومیوسن کاملاً قابل مشاهده است و در این منطقه می‌توان ناودیس فرودیواره حاصل از حرکت راندگی این گسل را دید.

۱-۶-۷- گسل امیرآباد

در مجاورت جاده دندی- تکاب و تقریباً به موازات جاده، در شمال روستای امیرآباد می‌توان راندگی دولومیت‌های جانگوتاران که مربوط به پی‌سنگ منطقه هستند را روی آندزیت‌های صورتی- بنفش و توف‌های سبز رنگ الیگومیوسن را مشاهده کرد. این گسل دارای امتداد شرقی- غربی است و شیب آن در آبراهه شمال روستای امیرآباد ۳۰ درجه به سمت شمال است، ولی به نظر می‌رسد به سمت شرق در جنوب معدن انگوران شیب آن کمتر از ۳۰ درجه است و فرادیواره آن دولومیت‌های جانگوتاران چین خورده‌اند. در فرودیواره گسل امیرآباد بلوک‌های بزرگی از دولومیت و آهک جانگوتاران وجود دارد که به صورت نابرجا روی توف‌های الیگومیوسن قرار دارن. در پیرامون روستای امیرآباد و در اطراف جاده، این بلوک‌ها زیاد هستند و حتی به نظر می‌رسد روستای امیرآباد روی یکی از این بلوک‌ها ایجاد شده است، احتمالاً در اثر راندگی این گسل بلوک‌ها از پیشانی گسل راندگی به پایین افتاده‌اند.

۱-۶-۸- گسل کاکا

این گسل در شمال روستای کاکا دیده می‌شود؛ امتداد آن جنوب شرقی- شمال غربی است. در شمال غربی روستای کاکا یک واحد توف داسیتی روشن رنگ دیده می‌شود که گسل آن را قطع کرده است و در امتداد گسل کاکا ادامه دارد و به نظر می‌رسد به دلیل مقاومت کم، تمرکز کرنش در امتداد این لایه رخ داده است. گسل کاکا

موجب راندگی هیالوآندزیت‌های پورفیری و در بخش‌هایی سنگ‌های آتشفشانی برشی الیگومیوسن روی مارن و شیل‌های سبز رنگ الیگومیوسن شده است. این گسل در شرق روستای کاکا موجب جابه‌جایی در واحد پی‌سنگ دگرگونی منطقه شده است، که به نظر می‌رسد این گسل به سمت شرق راستالغز راست‌بر است.

۱-۶-۹- گسل شیخ‌لر

در شرق روستای شیخ‌لر در مسیر دندی-انگوران قرار دارد یک گسل وارون دارای شیب ۵۰ درجه به سمت آزیموت ۲۶۵ درون توف‌برش‌های سبز رنگ الیگومیوسن مشاهده می‌شود. امتداد گسل شیخ‌لر متفاوت از دیگر گسل‌های منطقه است و جابه‌جایی زیادی ندارد، این گسل به سطح نمی‌رسد و توسط مجموعه‌ای از توف‌برش‌های بهم ریخته و برشی پوشیده شده است. تشکیل آن احتمالاً در ارتباط با بالا آمدن پی‌سنگ دگرگونی در بخش غربی و شکل‌گیری ناودیس دندی است.

۱-۶-۱۰- گسل بلقیس

در فاصله حدود ۴ کیلومتری شرق گسل چهارطاق یک گسل امتداد لغز راست‌بر با امتداد شمال غرب-جنوب شرق و تقریباً موازی با گسل چهارطاق دیده می‌شود، البته در کوه گورگور امتداد آن کمی متفاوت از چهارطاق است. این گسل از جنوب شرق آلاگین شروع می‌شود و پس از آن به سمت جنوب وارد کوه گورگور می‌شود. این گسل دارای حرکت راستالغز راست‌بر است و موجب جابه‌جایی راست‌بر در گسل‌های لعل‌کان، زندان سلیمان و کاکا شده است و احتمالاً در خمش گسل قره‌ناز موثر است. بلندترین قله منطقه که کوه قله کوه بلقیس است در محل تقاطع این گسل با گسل لعل‌کان ایجاد شده است و حرکت راست‌بر این گسل به همراه حرکت راندگی گسل لعل‌کان در شکل‌گیری این بلندی موثر بوده است.

۱-۷ - چین خوردگی‌ها

با توجه به روند محور چین‌های موجود در منطقه، سه نوع چین‌خوردگی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. دسته اول، چین‌خوردگی با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی است که این چین‌ها در واحد پی‌سنگی دگرگون منطقه وجود دارند و بیشتر در سنگ‌های قدیمی بیرون زده در فرادیواره گسل چهارطاق مشاهده می‌شوند. هم‌چنین در فرودیواره این گسل، در منطقه زره‌شوران که رخنمون‌هایی از پی‌سنگ وجود دارد چین‌های با این راستا وجود دارند. دسته دوم چین‌خوردگی‌هایی هستند که امتداد محور آنها شمالی - جنوبی است که بیشتر پیرامون گسل ماه‌نشان و در فرودیواره گسل چهارطاق در شمال شهر تکاب در واحد ماسه‌سنگ‌های قرمز رنگ میوسن مشاهده می‌شوند؛ با توجه به راستای آنها که به موازات گسل‌های بزرگ منطقه است به نظر می‌رسد این چین‌خوردگی‌ها با گسلش شمالی - جنوبی ارتباط زایشی دارند. دسته سوم چین‌هایی هستند که محور آنها دارای امتداد شمال شرقی - جنوب غربی است که با توجه به ساختار منطقه روند آنها به نظر می‌رسد به دلیل تغییر شکل در پی‌سنگ دگرگونی‌ها و بالآمدن آن در زیر پوشش رسوبی سنوزوئیک باشد. زیرا رخنمون دگرگونی‌ها در شمال غرب و جنوب شرق این ناودیس مشاهده می‌شود که به صورت فعال تحت تأثیر گسل‌های راندگی در حال بالآمدن هستند. شیب لایه‌بندی در رسوبات سنوزوئیک در محل شهر دندی تقریباً افقی است و با نزدیک شدن به واحدهای دگرگونی در شمال غرب و جنوب شرق، شیب افزایش می‌یابد.

۱-۱-۸- فاز کوهزایی منطقه

۱-۱-۱- فاز کوهزایی کاتانگایی

بر اثر جنبش زمین ساختی کاتانگایی پی‌سنگ پرکامبرین ایران، پاکستان، بخش‌هایی از افغانستان، ترکیه و عربستان به صورت پلت‌فرمی در آمده و به شکل یک پوسته پایدار عمل می‌کند. در این دوره کل مناطق توسط دریای کم عمقی پوشیده شده و پوشش رسوبی نازکی از نوع تبخیری به وجود آورده است. هم‌چنین فاز کوهزایی کاتانگایی منجر به وجود آمدن چندین گسل در ایران شده است. فاز کوهزایی کاتانگایی در اواخر پرکامبرین سبب تغییراتی در شمال غرب ایران به ویژه در منطقه تکاب شده است که سبب دگرگونی شدید سنگ‌های آذرین و رسوبی شده و پی‌سنگ پرکامبرین ایران به حالت پلت‌فرمی درآمده و توسط دریاهای کم پوشانده شده است. هم‌چنین شواهدی از سنگ‌های آتشفشانی عمدتاً نفوذی با ترکیب آلکالن در این دوره زمانی دیده می‌شود که نشانه‌ی فعالیت‌های ماگماتیسم و فاز کوهزایی کاتانگایی است. از جمله گرانیات دوران، زریگان، نریگان، قره‌داش در آذربایجان و توده‌های آتشفشانی در نوار سنندج- سیرجان نشانه فعالیت فاز کوهزایی کاتانگایی است.

۱-۱-۲- فاز کوهزایی لارامید

این فاز کوهزایی شامل رخدادهای مرز بین کرتاسه تا پالئوسن است که تحولات بسیار بزرگ و پیچیده‌ای در ایران رخ داده است که عبارتند از: جایگزینی افیولیت ملائزه‌های ایران شکسته شدن پوسته‌های اقیانوسی و رانده شدن بر روی لبه‌های قاره‌ای، دگرگونی شدید در نوار سنندج- سیرجان و فعالیت‌های آتشفشانی شدید در آذربایجان، البرز و ایران مرکزی همگی در این فاز کوهزایی رخ داده‌اند. مهم‌ترین فاز زمین ساختی در شمال غرب ایران فاز کوهزایی لارامید بوده که در اواخر کرتاسه و اوایل ائوسن به وقوع پیوسته است که به سبب آن

ارتفاعات اولیه منطقه تشکیل شده و همچنین اسکلت اولیه ناهمواری‌های منطقه تخت سلیمان ایجاد شده است.

۱-۹- ژئومورفولوژی منطقه‌ی مورد مطالعه

طبق تقسیم‌بندی‌های ژئومورفولوژیکی، مناطق با ارتفاع بیش از ۵۰۰ متر، منطقه‌ی کوهستانی، مناطق با ارتفاع بین ۵۰-۵۰۰ متر تپه ماهور و مناطق با ارتفاع کمتر از ۵۰ متر به عنوان دشت در نظر گرفته می‌شوند. شیب در مناطق کوهستانی عموماً بیشتر از ۲۵ درصد است، در مناطق تپه ماهوری ۸-۲۵ درصد و در دشت‌ها کمتر از ۸ درصد است. از دیدگاه مورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه در میان کوه بلقیس در شمال، کوه قبله داغ در جنوب، کوه گورگور در مغرب و کوه جانگوتاران در مشرق واقع شده است و یک منطقه کوهستانی محسوب می‌شود. عوارض زمین ریخت‌شناسی منطقه به گونه‌ای فراگیر توسط عناصر ساختمانی کنترل می‌شود و بلندترین نقطه‌ی آن در ناحیه‌ی قله بلقیس با ارتفاع ۳۳۳۰ متر از سطح دریا قرار دارد. ارتفاع تخت سلیمان ۲۲۰۹ متر بوده و عناصر زمین‌ساختی آن از روند غالب زاگرس (شمال‌غربی - جنوب‌شرقی) پیروی می‌کند. دره‌های منطقه نیز پرشیب بوده و عموماً V شکل بوده و از امتداد گسل‌ها پیروی می‌کنند.

۱-۱۰- هیدرولوژی منطقه‌ی مورد مطالعه

به طور کلی در مناطق کارستی، مقدار زیادی از نزولات جوی بسته به شرایط هیدرولوژی، هیدروژئولوژی، زمین ریخت‌شناسی و تکامل کارستی به درون زمین نفوذ می‌کنند و از این رو رواناب کم‌تری نسبت به مناطق غیرکارستی ایجاد می‌شود. رودخانه دائمی تخت سلیمان و چوپلی کانی شفا و رودخانه‌های فصلی چهارطاق و آلاسقل در فصل بهار که از آب شدن برف‌ها مقادیر زیادی از مواد و سنگ و خاک‌های منطقه را شسته و جابه‌جا

نموده و به خارج از منطقه منتقل می‌نمایند. مسیر رودخانه‌ها نیز اکثراً مناطق گسلی یا در امتداد گسل‌های منطقه می‌باشد.

فصل دوم:

مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه

آب‌های زیرزمینی، از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است. در دهه‌های اخیر، افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی برای مصارف مختلف، با کاهش جدی این منابع در بخش‌های مختلف جهان همراه شده است (Klove et al, 2013). این امر عمدتاً ناشی از رشد زیاد جمعیت به ویژه در شهرهای بزرگ، تغییر شرایط اقلیمی، کاربری مدرن اراضی و افزایش تقاضا برای تأمین آب است. کاهش منابع آب زیرزمینی، آلودگی فزاینده‌ی آب و کاهش قابلیت شرب آنها را نیز به همراه دارد (Ravikumar et al, 2010). کیفیت آب، حاصل شرایط فیزیکی و شیمیایی آب و همچنین تغییراتی است که از موقعی که در جو تشکیل و تراکم یافته، تا زمان ظهور آب در سطح زمین، بر روی آن اعمال شده است. از آنجایی که سنگ‌های مناطق کارستی نفوذپذیری بالایی دارند، در این مناطق، آبخوان‌هایی با کمیت و کیفیت نسبتاً خوبی شکل می‌گیرد که محافظت و مراقبت از این آبخوان‌ها بسیار حائز اهمیت است.

۲-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی

منابع آب کارستی، از جمله منابع بسیار با ارزشی هستند که به دلیل داشتن کیفیت مطلوب در تأمین آب مورد نیاز جهت مصارف شرب، مورد توجه بسیار بوده است. حدود ۲۰ درصد از منابع آب‌های زیرزمینی جهان در واحدهای کارستی ذخیره شده و به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین کننده‌ی نیازهای آبی در سطح کره زمین شناخته شده است (Ford and Williams, 2007). در ایران حدود ۱۱ درصد از وسعت کشور و حدود ۹۰ درصد از ارتفاعات زاگرس، از سازندهای کارستی تشکیل شده‌اند (افراسیابیان، ۱۳۷۷). آبخوان‌های کارستی در مقایسه با دیگر آبخوان‌ها، شرایط بهتری را برای نفوذ و تغذیه دارند (simsek et al, 2008). چشمه‌های کارستی می‌توانند اطلاعات مهم و با ارزشی را در مورد فرآیندهای هیدروژئولوژیکی و ساختار درونی آبخوان‌ها، به ویژه در

رابطه با سیستم جریان‌های پیچیده‌ی آب زیرزمینی که در آنها اندازه‌گیری نقطه‌ای از چاه‌ها امکان‌پذیر نیست، در اختیار بگذارند و منعکس‌کننده‌ی فرآیندهایی باشند که در یک مقیاس بزرگ اتفاق می‌افتد (Manga, 2001). در بیشتر موارد می‌توان با استفاده از داده‌های سری زمانی تخلیه چشمه‌ها و منحنی‌های فروکش آنها، با هزینه بسیار پایین، در مورد خصوصیات سفره آبدار کارستی اظهار نظر کرد و نوع جریان (مجرای و افشان)، سهم هر نوع جریان، نوع و حجم آب ورودی، رژیم تغذیه (بارانی یا برفی) و حتی روند تغذیه‌ی یک چشمه کارستی را تعیین نمود. قدیمی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی هیدروشیمیایی چشمه کارستی اشتران‌کوه پرداختند. نتایج بررسی آنها نشان‌دهنده این بود که تیپ و رخساره‌ی چشمه‌های مورد بررسی از نوع بی‌کربناته کلسیک می‌باشد. برآورد شاخص اشباع در چشمه‌های منطقه مورد بررسی بیان‌گر این بود که این منابع نسبت به کلسیت اشباع بوده ولی نسبت به دولومیت تحت اشباع هستند. نتایج بررسی مهم‌ترین عامل را به انحلال کربنات و سپس به منیزیم و هدایت الکتریکی نسبت داد. همچنین از نظر سختی آب این چشمه‌ها نسبتاً سخت و سخت است. میرحسینی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی چشمه‌های کارستی کلالة در استان گلستان پرداخته‌اند. نتایج مطالعات آنها بیان‌گر این است که همه‌ی چشمه‌ها تقریباً دارای منشأ یکسان و تیپ غالب چشمه‌ها بی‌کربناته - کلسیک می‌باشند. فرآیند تبادل یونی مستقیم علاوه بر پدیده انحلال در منطقه تا حدودی رخ داده است. تمامی چشمه‌ها نسبت به ژئوپس و هالیت تحت اشباع ولی نسبت به کلسیت و دولومیت اشباع تا فوق اشباع هستند. محمدی و همکاران (۱۳۹۷)، به بررسی کیفی چشمه‌های کارستی کرمانشاه با استفاده از مدل‌های آماری و هیدروشیمیایی پرداختند و دریافتند که تیپ و رخساره‌ی آهک‌های بیستون و پل‌ذهاب در منطقه مورد بررسی از نوع بی‌کربنات بوده و این در حالی است که برای چشمه‌های سراب گرم و قره‌بلاغ از نوع بی‌کربنات کلسیک تعیین کردند. توکلی و همکاران (۱۳۹۶) ضمن بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب مجن نتیجه گرفتند که تیپ و رخساره‌ی آب در کلیه‌ی چشمه‌های مورد بررسی از نوع بی‌کربنات کلسیک هستند و همچنین دارای سختی موقتی هستند. همچنین در

بررسی نمودار شولر نشان دادند که کلیه نمونه‌ها از نظر منشأ یکسان بوده و کیفیت مناسبی را جهت آشامیدن دارند.

اکبری و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی شهرستان نورآباد پرداخته‌اند. با ارزیابی نتایج حاصل از بررسی نمودارهای پایپر و استیف، تیپ و رخساره‌ی آب را از نوع بی‌کربناته-کلسیک تعیین کردند.

براساس فرآیند تبادل یونی در چشمه‌های مورد مطالعه، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر کیفیت آب چشمه‌ها را، نزولات جوی و بارش تعیین کردند. در ادامه به مرور مطالعاتی پیرامون کارست و اهمیت آن، ارتباط تکتونیک با کارست، تغذیه در کارست، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی، بررسی حوضه آبریز در چشمه‌های کارستی، طبقه‌بندی چشمه‌های کارستی و هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی پرداخته خواهد شد.

۲-۳- تعریف و اهمیت کارست

کارست عبارت است از منطقه‌ای با هیدرولوژی و مورفولوژی خاص و یک سیستم زهکش بزرگ است که از انحلال سنگ‌های کربناته، با قابلیت انحلال بالا در آب‌های طبیعی ایجاد می‌شود (Karami 2002). مناطق کارستی عمدتاً بر روی سنگ‌های کربناته (به ویژه سنگ آهک) گسترش می‌یابند و هم‌چنین در روی دیگر سنگ‌ها که قابلیت انحلال بسیار بالایی دارند (سنگ نمک و گچ) نیز ممکن است اتفاق بیوفتد. پدیده‌های کارستی در بخش‌های مختلف به ویژه در زاگرس، البرز و به صورت خیلی محدود در ایران مرکزی، شرایط مناسبی را در شکل‌گیری سفره‌های آب زیرزمینی فراهم نموده که در تأمین آب مورد نیاز برای شرب، کشاورزی و صنعت نقش مهمی دارد. هم‌چنین آب‌های زیرزمینی موجود در آبخوان‌های کارستی در حال حاضر آب یک سوم کل جهان را تأمین می‌کند (Ford and Williams, 2007). عواملی نظیر مدت زمان تماس سنگ‌ها با آب و

هوا، میزان پوشش گیاهی و میزان گاز کربنیک با منشأ زیستی در توسعه اشکال کارستی موجود در حوضه نقش مهمی دارد.

۲-۴- چشمه‌های کارستی

چشمه‌های کارستی در حقیقت محل تخلیه طبیعی آبخوان‌های کارستی هستند که نمونه‌برداری و استفاده از آنها در مقایسه با بهره‌برداری از طریق حفاری و پمپاژ آسان‌تر و کم هزینه‌تر است. مجاری انحلالی در این سیستم‌ها در ارتباط با چشمه‌های کارستی بوده و از این رو تجزیه و تحلیل، تغییرات و نحوه فروکش دبی و هم‌چنین غلظت یون‌های محلول در چشمه‌ها می‌تواند انعکاس دهنده‌ی ویژگی‌های کل سیستم باشد (Bogli, 1989). از مهم‌ترین خصوصیات پهنه‌های کارستی می‌توان به چشمه‌های موقت و دائم اشاره کرد که در نتیجه‌ی عمل مستقیم فرآیندهای ایجاد کننده‌ی کارست ایجاد شده‌اند. اکثر چشمه‌های مهم کارستی در امتداد سطح اساس فرسایش یعنی در مرز محیطی پلایه‌های کارستی، دره‌های رودخانه‌ای و سواحل دریا واقع شده‌اند که مشخصه‌ی مشترک این نوع چشمه‌ها هم موقت و هم دائم، وابستگی مستقیم بین بارش و جریان خروجی آن‌ها است (Milanovic 1981). هم‌چنین ظرفیت و مشخصه‌ی هیدرولوژیکی چشمه‌های کارستی به عواملی چون سطح حوضه‌ی آبریز، ظرفیت تأخیری آبخوان، تخلخل مؤثر و ترکیب زمین‌شناسی بستگی دارد. یکی از خصوصیات چشمه‌های کارستی، تغییر ناگهانی کیفیت آب آن‌ها پس از وقوع بارندگی بوده که البته این تغییرات در دامنه‌ی محدودی صورت می‌گیرد (Ryan and Meiman 1996).

۲-۵- طبقه‌بندی چشمه‌های کارستی

عوامل به وجود آورنده‌ی چشمه‌ها بسیار زیاد است، بنابراین طبقه‌بندی چشمه‌ها متنوع بوده و براساس ویژگی‌های متفاوتی نظیر خصوصیات هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و تکتونیکی تقسیم می‌کنند

(Ford and Williams 2007). همچنین خصوصیات دیگری نظیر شرایط زمین‌شناسی و زمین‌ساختاری، خصوصیات آبخوان، میزان آبدهی، دائمی یا موقتی بودن، کیفیت شیمیایی آب، منشأ آب و ... طبقه‌بندی کرده‌اند (Chow 1988).

۲-۵-۱- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس خصوصیات هیدروژئولوژیکی

فورد و ویلیامز (Ford and Williams 2007) چشمه‌های کارستی را براساس ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی به سه گروه تقسیم کرده‌اند:

- ۱- چشمه‌های آزاد (Free Springs): در این چشمه‌ها، آب در جهت شیب به داخل دره تخلیه می‌شود و سیستم کارستی کاملاً و یا به طور عمده از نوع کارست کم عمق است.
- ۲- چشمه‌های سدی (Dammed Springs): این نوع چشمه‌ها، در اثر قرار گرفتن یک مانع در مسیر حرکت یا زهکشی آب زیرزمینی ایجاد می‌شوند.
- ۳- چشمه‌های محبوس (Confined Springs): شرایط آرتزین در سنگ‌های کارستی که به وسیله یک سازند غیرقابل نفوذ محدود می‌شوند، عامل ایجاد این نوع چشمه‌ها هستند.

۲-۵-۲- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس هیدروگراف جریان خروجی

چشمه‌ها براساس هیدروگراف جریان خروجی به چهار گروه تقسیم شده‌اند (Bogli 1980). چشمه‌های دائمی (Prennial Springs)، چشمه‌های فصلی (Priodic Springs)، چشمه‌های متناوب یا ریتمیک (Rhythmic Springs)، چشمه‌های ناگهانی یا اتفاقی تقسیم نموده است.

۲-۵-۳- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس منشأ آب

بوگلی (Bogli 1980) چشمه‌ها را براساس منشأ آب به سه گروه تقسیم کرده است:

الف- چشمه‌های Resurgence: چشمه‌ای که خروجی مجدد رودخانه گم شده می‌باشد.

ب- چشمه‌های Emergence: منشأ آب در این وضعیت مشخص نیست.

ج- چشمه‌های Exsurgence: نشان دهنده‌ی نشت آب‌های کارستی است.

۲-۵-۴- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس شرایط زمین‌شناسی و ساختاری

براساس شرایط زمین‌شناسی و ساختاری، چشمه‌ها به چهار گروه تقسیم شده‌اند (Bogli 1980). چشمه‌های

صعودی (Ascending Springs)، چشمه‌های خروجی از شکستگی (Springs Emerging from fractures)،

چشمه‌های لایه‌ای (Bedding Springs)، انواع چشمه‌های سرریزی (Overflow types of Springs).

۲-۶- ارتباط تکتونیک با کارست

از مهم‌ترین عوامل تشکیل کارست در سازندهای آهکی و تغییرات آن در طول زمان، عوامل تکتونیکی هستند.

پدیده‌هایی نظیر گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، درزه‌ها، امتداد و شیب سطوح لایه‌بندی در ایجاد و توسعه‌ی کارست،

شناخت منابع آب کارست، شناخت رابطه کارستی شدن و سیستم ساختاری یک منطقه مؤثر هستند

(Milanovic 1981). از مهم‌ترین اشکال مورفولوژی در مناطق کارستی فروچاله است. شکل و محل تشکیل

فروچاله‌ها در بیشتر مواقع به وسیله تکتونیک تعیین می‌شوند، از این رو معمولاً در طول گسل‌ها یافت می‌شوند.

فروچاله‌ها اغلب در نزدیکی گسل‌ها، تشکیل شده و محور طویل آن‌ها در جهت شکستگی‌های اصلی تکتونیکی

منطقه است (Milanovic 1981). عوامل تکتونیکی تأثیر قابل توجهی بر روی هیدروژئولوژی سنگ‌های کربناته و

آهکی دارد، زیرا با انحلال آهک شبکه‌های کارستی ایجاد می‌شوند. این تأثیر به طور مستقیم توسط شرایط جریان آب اعمال شده که به توزیع منافذ وابسته است که به وسیله تکتونیک، درون سنگ آهک به وجود آمده است. گولدشایدر و همکاران (Goldsheider et al, 2010)، با بررسی آبخوان‌های کارستی اتریش متوجه شدند که ناودیس‌های پلانژدار، اصلی‌ترین مجاری آب‌گذری زیرزمینی را به وجود آورده است. زمانی که سطح اساس آبخوان کارستی بالاتر از سطح اساس سنگ بستر باشد، جریان آب زیرزمینی از شیب لایه‌ها به سمت خط‌القعر ناودیس پلانژدار است و تاقدیس‌ها به عنوان مرز تقسیم آب عمل می‌کنند. شکری و همکاران (۱۳۷۴)، به بررسی و ارزیابی تأثیر تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت‌یابی جریان آب زیرزمینی حوضه آبگیر چشمه علی دامغان با استفاده از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی و همچنین داده‌های آب‌دهی چشمه پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که عملکرد گسل‌ها در منطقه سبب شده که این چشمه به عنوان سطح اساس فرسایش رخنمون‌های آهکی عمل کرده و آب به سمت چشمه حرکت کند. گانی (GUNNAY 2006)، بر روی چشمه کارستی ساکاریاباسی در کشور ترکیه مطالعه کرد و با استفاده از ابزارهای هیدروژئولوژی، داده‌های شیمیایی و ایزوتوپی به تعیین ارتباط هیدروژئولوژیکی بین مناطق تغذیه و و تخلیه‌ی چشمه‌ها پرداخت. نتایج ارزیابی نشان داد که در تشکیل این چشمه‌ها، عامل تکتونیک نقش مهم و اساسی داشته و باعث به وجود آمدن یک توپوگرافی ملایم در منطقه شده است.

۲-۷ - خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی

یکی از مهم‌ترین مطالعات در سفره‌های کارستی، ارزیابی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و روند تغییرات آن‌ها است که با استفاده از آن‌ها می‌توان نوع سیستم جریان را مشخص کرد. برای ارزیابی خصوصیات هیدروشیمیایی جریان آب زیرزمینی از یکسری اطلاعات استفاده می‌شود که این اطلاعات به عوامل مختلفی از قبیل زمین‌شناسی محل، میزان و نوع هوازدگی سنگ‌ها، کیفیت آب تغذیه‌ای به داخل سفره و همچنین واکنش‌های

هیدروژئوشیمی وابسته است (Coetsiers and walraevens 2006). به دلیل ناهمگنی زیاد سفره‌ها بررسی خواص هیدروژئولوژیکی سفره‌های کارستی دشوار است (Mohammadi and Field 2009). با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی می‌توان برخی از خصوصیات مسیر حرکت آب و نوع سیستم جریان غالب را تشخیص داد. یک روش رایج و کم هزینه جهت مطالعه سفره‌های کارستی، بررسی تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی می‌باشد (Raeisi et al, 2006). به منظور شناخت رفتار هیدروژئولوژیکی لایه‌های آبدار کارستی در مناطق مختلف، مطالعات بسیاری در زمینه‌ی بررسی تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در مناطق کارستی صورت گرفته است (نوری ۱۳۸۹). از جمله افرادی که در این زمینه مطالعه کرده‌اند می‌توان به کارهای زولت (Zolt 1960)، گامز (Gams 1966) و پیتی (Pitty 1966, 1968) اشاره نمود. گارلز و کریست (Garrels and Christ 1965)، جریان آب زیرزمینی در سنگ‌های کربناته را به دو سیستم باز و بسته تقسیم کردند. در سیستم باز، هیچ محدودیتی در میزان کربن دی اکسید مورد نیاز برای انحلال کربنات کلسیم وجود ندارد، در حالی که در سیستم بسته، پس از مصرف کربن دی اکسید موجود انحلال سنگ آهک به اتمام می‌رسد. شاستر و وایت (Shuster and White 1971)، جریان در آبخوان‌های کارستی را به دو سیستم افشان (Diffuse) و مجرای (Conduit) تقسیم نمودند. براساس مطالعات ایشان، جریان در سفره‌های کارستی براساس میزان تغییرپذیری خواص فیزیکی و شیمیایی نظیر هدایت الکتریکی، دما، یون‌های کاتیونی و آنیونی و دبی در یک سال آبی در طی وسیعی قرار گرفته که دو حد نهایی آن سیستم‌های جریان افشان و مجرای است. سیستم‌هایی که به صورت جریان افشان هستند، حرکت آب به صورت خطی، از میان شکستگی‌های به هم پیوسته‌ای که بازشدگی کمتر از یک سانتی‌متر دارند انجام می‌شود. در این نوع چشمه‌ها، تغییرات فیزیکی و شیمیایی زیادی مشاهده نمی‌شود هم‌چنین این چشمه‌ها متعدد، پراکنده با دبی پایین بوده و هدایت الکتریکی در آن‌ها در کل توده تقریباً به شکل یکنواخت است. عمل تغذیه در این نوع سیستم‌ها به صورت مستقیم و از طریق درز و شکاف‌های موجود در سنگ‌های کربناته‌ی دربرگیرنده و پوشش‌های خاک

فوقانی انجام می‌پذیرد. در حوضه آبگیر مربوط به این گونه سیستم‌ها، عوارض ژئومورفولوژیکی چون فروچاله و غار مشاهده نشده و شاخص تغییرات سختی کل در آن‌ها کم‌تر از ۵ درصد است. جریان آب در سیستم‌های مجرای، در کانال‌های بزرگ و مجاری لوله مانند با بازشدگی بزرگ‌تر از یک سانتی‌متر انجام می‌شود که این مجاری ناشی از پدیده‌های انحلالی انجام شده در کربنات‌ها است. هدایت الکتریکی در این سیستم‌ها بسیار بیشتر بوده و از این رو جریان آب در آن‌ها به صورت آشفته است. تخلیه‌ی طبیعی معمولاً از طریق یک چشمه‌ی بزرگ با دبی زیاد و تغذیه آن توسط درزه‌ها و فروچاله‌های موجود در سنگ‌هایی که فاقد پوشش گیاهی می‌باشند انجام می‌شود. شاخص تغییرات سختی کل نیز برای این نوع جریان در محدوده ۲۴-۱۰ درصد متغیر است. نیوسن (Newson 1972) و ترنان (Ternan 1972) نیز طبقه‌بندی بالا را تأیید نموده‌اند. کول و فورد (Cowell and Ford 1983) با بررسی تغییرات دمایی چشمه‌های کارستی جنوب کانادا متوجه شدند که تغییرات دمای آب در طول یک سال آبی در چشمه‌های کارستی با سیستم مجرای بیش‌تر از چشمه‌های افشان است. در نتیجه تغییرات دما را معیاری برای تشخیص سیستم جریان حاکم در سفره‌های کارستی در نظر گرفتند. فورد و ویلیامز (Ford and Williams 1989) سیستم جریان کارستی را به دو گروه مجرای و افشان تقسیم کرده‌اند. رحیمی و همکاران (۱۳۹۲) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه کارستی پیرغار در تاکدیس سالدوران را بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که ضریب تغییرات پارامترهایی چون دبی و هدایت الکتریکی در این چشمه بسیار بالا بوده و سیستم جریان حاکم در آن از نوع مجرای است. کریمی و همکاران (۱۳۸۳) چشمه کارستی گیلان در جنوب غرب کرمانشاه را بررسی کردند و در حین بررسی‌های خود نوعی جریان تحت عنوان جریان افشان کاذب را مطرح کردند. در این نوع جریان، اگر جریان مجرای حاکم باشد، تأخیر در پیوستن آب‌های دور دست باعث رفتاری شبیه سفره‌های افشان می‌شود. چنین سیستم جریانی دارای ماهیت جریان مجرای و ظاهری به صورت جریان افشان است که جریان افشان کاذب نامیده می‌شود.

۲-۷-۱- تغییرات آب‌دهی

تغییرات آب‌دهی چشمه‌ها، به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها در شناخت نوع سیستم جریان در سفره‌های کارستی استفاده می‌شود کرمی و همکاران (۱۳۸۷). به طور کلی میزان آب‌دهی در سفره‌های مختلف متغیر بوده و از کم‌تر از ۰/۰۰۱ لیتر بر ثانیه تا ۱۰۰۰۰ لیتر بر ثانیه متغیر است. آب‌دهی چشمه‌ها، به عوامل مختلفی نظیر وسعت حوضه‌ی ابگیر، تغذیه سالانه در حوضه و تراوایی سفره وایسته است (Milanovic 1981). تراوایی آبخوان از مهم‌ترین پارامترهایی است که تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به این صورت که هر چه تراوایی آبخوان کارستی بیش‌تر، تغییرات آب‌دهی چشمه نیز بیش‌تر و برعکس هر چه تراوایی کم‌تر، تغییرات آب‌دهی چشمه کم‌تر است. در حقیقت تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی یک معیار مهم برای تفکیک آبخوان‌های کارستی با سیستم جریان مجرای حاکم از آبخوان کارستی با سیستم غالب جریان افشان می‌باشد (کرمی و همکاران ۱۳۸۷). مینویی و همکاران (۱۳۸۹)، خصوصیات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی قلو و تلوکسان را در بخش شمالی کوهستان شاهو مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به دست آمده از ضرایب بده و دیگر خصوصیات هیدروژئوشیمیایی در این چشمه‌ها نشان دادند که، نوع سیستم غالب در این چشمه‌ها مجرای است. شفیع و لشکری پور (۱۳۸۷) چشمه کارستی کورسا دهشت در جنوب غرب ایران را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به دست آمده از بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی و آنمود چشمه تعیین کرد که سیستم جریان در این چشمه از نوع مجرای- افشان است.

۲-۷-۲- تغییرات دمای آب

تغییرات دمای چشمه‌های کارستی، یکی از معیارهای تعیین سیستم جریان است. برای بررسی این تغییرات از دماسنج‌های دقیق استفاده می‌گردد زیرا تغییرات دما در چشمه‌های کارستی حدود چند دهم درجه سانتی‌گراد است (نوری ۱۳۸۹). جیکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir 1974)، بیان کردند که ضریب تغییرات

دمای آب، بهترین شناساگر جهت تشخیص نوع سیستم کارستی است. (Raeisi and Karami 1997). ضمن مطالعه چشمه کارستی برغان در شمال غرب شیراز متوجه شدند که وقتی سیستم جریان افشان باشد، به دلیل این که جریان آب از میان درزها و شکاف‌های کوچک به آهستگی عبور می‌کند، تحت تأثیر دمای آب واقع نشده و تحت تأثیر دمای سنگ‌های تشکیل‌دهنده سفره قرار گرفته است. همچنین در یک سفره‌ی کارستی با سیستم جریان مجرای، جریان آب از میان کانال‌ها و شکستگی‌های بزرگ صورت می‌گیرد، در نتیجه دمای آب خروجی از چشمه‌ی کارستی تحت تأثیر دمای هوا قرار گرفته است. پیتی و همکاران (Pitty et al, 1979)، نوسانات درجه حرارت را در آب‌های آهکی مرکز و جنوب پنینز انگلستان بررسی کردند و بیان نمودند که سه عامل دمای آب زیرزمینی، عمق و اندازه‌ی جریان آب زیرزمینی در متغیر بودن درجه حرارت آب داخل کارست نقش دارند. به طور کلی در چشمه‌های کارستی با جریان افشان، ضریب تغییرات دمای آب کم‌تر از ۵ درصد و در چشمه‌های با سیستم جریان مجرای بزرگ‌تر از ۵ درصد است.

۲-۷-۳- تغییرات هدایت الکتریکی

یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در مطالعات منابع آب، هدایت الکتریکی است که با کل املاح محلول در آب رابطه‌ی مستقیم دارد و می‌توان با یک هدایت‌سنج الکتریکی با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری کرد. محدوده تغییرات هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی نسبت به آبخوان‌های آبرفتی کم‌تر بوده و مقدار آن معمولاً از حدود ۲۰۰ تا چند صد میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. معمولاً ضریب تغییرات هدایت الکتریکی در سفره‌های کارستی با جریان‌های مجرای و افشان به ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از ۱۰ درصد است (Scanlon and Thraikill 1987, Raeisi and Karami 1997). جیکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir 1974)، چشمه‌های کارستی دره نیتانی را مورد مطالعه قرار داده و آن‌ها را به چهار گروه تقسیم نمودند:

الف- چشمه‌های مجرای با هدایت الکتریکی کمتر از ۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، ضریب تغییرپذیری هدایت الکتریکی و تخلیه به ترتیب بیش‌تر از ۲۰ درصد و بیش‌تر از ۱۵۰ درصد است.

ب- چشمه‌های مجرای- افشان با هدایت الکتریکی بین ۳۰۰-۴۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و ضریب تغییرپذیری برای هدایت الکتریکی و تخلیه به ترتیب ۱۰-۲۰ درصد و بیش‌تر از ۴۰ درصد است.

ج- چشمه‌های افشان با هدایت الکتریکی بین ۴۰۰-۶۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، ضریب تغییرپذیری برای هدایت الکتریکی و تخلیه به ترتیب کم‌تر از ۱۰ درصد و کم‌تر از ۲۰ درصد است.

۲-۷-۴- تغییرات غلظت یونی

آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف کم و بیش حاوی مقادیری از نمک‌های محلول می‌باشند. نوع و غلظت این املاح وابسته به عواملی نظیر منشأ آب، سرعت حرکت آب، میزان تماس سنگ‌ها با آب و مسافتی که آب پیموده وابسته است. اغلب مواد محلول در آب ناشی از انحلال سنگ‌ها است. با توجه به زمان ماندگاری آب در لایه‌ها و طول مسیری که توسط آب پیموده می‌شود، ترکیب شیمیایی آن از نظر نوع و مقدار تغییر می‌کند (ازانی ۱۳۹۵). لامبان و همکاران (Lamban et al 2015)، به ارزیابی هیدروشیمیایی و ایزوتوپی چشمه‌های کارستی در پنومپ (PNOMP) اسپانیا پرداخته و فهمیدند که رخساره‌های شیمیایی موجود در آب این منطقه کلسیم-بی‌کربنات و کلسیم، منیزیم-بی‌کربنات است و اختلاف بین ارتفاع منطقه تغذیه و تخلیه نقش مؤثری در تغییر رخساره دارد. نوری (۱۳۸۹)، ضمن مطالعه بر روی نسبت کلسیم به منیزیم در چشمه‌ی کارستی آبدانان به این نتیجه رسید که پایین بودن درصد خلوص آهک در سازند ایلام-سروک بیان‌گر پتانسیل کم‌تر آن جهت تشکیل سیستم‌های کانالی و توسعه‌ی کارست بوده و سیستم غالب جریان در آن از نوع افشان است.

۲-۱- برآورد میزان تغذیه در چشمه‌های کارستی

تغذیه‌ی لایه‌های کارستی به سه طریق نفوذ به داخل خاک، نفوذ از طریق درز و شکاف‌ها و نفوذ به داخل فروچاله‌ها انجام می‌گردد. بیش‌ترین میزان نفوذ در سنگ‌های آهکی، از طریق مجاری انحلالی و درز و شکاف‌ها انجام می‌شود. کرمی (۱۳۷۲)، بیان نمود که ظرفیت نفوذ در این شکاف‌ها به مواردی از قبیل: میزان بازشدگی شکاف‌ها، فاصله بین شکاف‌ها، عمقی بودن شکاف‌ها، وجود یا عدم وجود خاک و سنگ‌ریزه و شیب عمومی رخنمون سنگی وابسته است. فرایند تغذیه می‌تواند به صورت مستقیم (تغذیه‌ی نقطه‌ای) از طریق پانر، دولین، استاول و یا توسط نفوذ انتشاری از سطوح برکه مانند طبیعی و یا توسط نفوذ مستقیم آب باران و آب ناشی از ذوب برف به درون شبکه‌های درز و شکاف صورت پذیرد. براساس مطالعات وایت (White 2002)، تغذیه سفره‌های کارستی به چهار روش صورت می‌گیرد:

الف- تغذیه‌ی خودزا (Autogenic recharge): منطقه به طور کامل از سنگ‌های کارستی تشکیل شده است و به وسیله‌ی آب‌های جوی تغذیه می‌شود.

ب- تغذیه‌ی دگرزا (Allogenic recharge): آب‌های مناطق کارستی مجاور سبب تغذیه‌ی سیستم می‌شوند.

ج- رواناب سطحی (Internal runoff): آب باران مستقیماً از طریق فروچاله‌ها وارد سیستم می‌گردد.

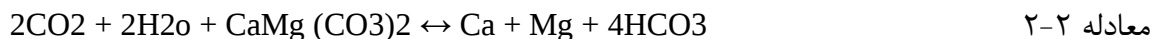
د- آب باران در سنگ‌های پوشاننده‌ی سفره کارستی تجمع یافته و مازاد آن از طریق درز و شکاف‌های توسعه یافته وارد سفره کارستی می‌شود.

کاتسانو و همکاران (Katsanou et al, 2010)، به مطالعه منشأ آب چشمه‌ی استفانی کوک کینو در غرب یونان پرداختند و از وضعیت زمین‌شناسی منطقه و سری‌های زمانی داده‌های هیدروشیمیایی چشمه استفاده کردند. دمای بالا، بالا بودن غلظت یون‌های Na ، B ، F ، Li و تیپ آب (Na-Ca-HCO_3) همگی بیان‌گر این موضوع بودند که چشمه مذکور از آبخوان‌های عمیق منشأ می‌گیرد. جیانگ و گائو (Jiang and Gau 2010)، با استفاده از

روش‌های زمین‌شناسی، هیدروشیمیایی، ژئومورفولوژیکی و ایزوتوپی به بررسی منشأ تغذیه چشمه کارستی لینگ‌شای در ایالات متحده پرداختند و متوجه شدند که منشأ الوژنیک (رودخانه‌های سطحی) در تغذیه این چشمه دخالت نداشته و تغذیه چشمه بیش‌تر از طریق آبخوان عمیق منطقه صورت می‌گیرد. باقری و همکاران (۱۳۸۶)، با استفاده از اطلاعات هیدروشیمیایی، ایزوتوپی، بیلان و بررسی‌های تکتونیکی مطالعاتی بر روی چشمه‌های کارستی بخش شرقی تاق‌دیس راوندی انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه چندین منشأ احتمالی برای چشمه‌ها در نظر گرفتند و با توجه به جایگاه تکتونیکی و زمین‌شناختی، توپوگرافی و شیب هیدرولیکی منشأ تغذیه این چشمه‌ها را تاق‌دیس واقع در بالادست تاق‌دیس راوندی در نظر گرفتند. برای برآورد میزان تغذیه آبخوان‌ها روش‌های گوناگونی وجود دارد که در این مطالعه از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی و هم‌چنین مشاهدات صحرایی برای تخمین تغذیه، استفاده شد.

۲-۹- عوامل مؤثر بر توسعه کارست

عمل انحلال سنگ‌ها، علت اصلی پدیده کارستی شدن در سطح و زیرسطح زمین است و پهنه‌های کارستی پس از میلیون‌ها سال انحلال مداوم تحت تأثیر آب‌های طبیعی در سنگ‌های دارای قابلیت انحلال به ویژه آهک و دولومیت شکل می‌گیرند. معادله انحلال کانی کلسیت و دولومیت در آب‌های حاوی دی اکسید کربن محلول به شکل زیر است (Ford and Williams 2007).



وایت (White 1988)، عوامل مؤثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست را به سه گروه عوامل فیزیکی، شیمیایی و هیدروژئولوژیکی تقسیم نمود. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به مواردی نظیر مقدار بارندگی، درجه حرارت، فشار گاز کربنیک، پستی و بلندی، وضعیت چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی، ضخامت لایه‌های کربناته و موقعیت

زمین‌ساختی منطقه اشاره کرد. کریمی وردنجانی (۱۳۸۹)، بیان کرد که پارامترهای اقلیمی به یکدیگر وابسته بوده و در هر اقلیم خاص، محدوده تغییرات خاصی از دما، فشار گاز دی اکسید کربن و رطوبت وجود دارد لذا بهتر است اثر این عوامل در اقلیم‌های مختلف بررسی شود.

۲-۹-۱- بارش

میزان بارش و وجود آب عامل اصلی اقلیمی مؤثر در توسعه کارست است. در شرایط یکسان هر چه مقدار و حجم نزولات در یک منطقه بیشتر باشد، مقدار نفوذ بیشتر در نتیجه توسعه کارست بیش‌تر می‌شود. توسعه کارست در مناطق خشک و یا بسیار سرد کم است زیرا در این شرایط آب و هوایی آب به صورت مایع کم بوده و باعث محدود شدن فرآیند انحلال می‌شود. فورد و ویلیامز (Ford and Williams 2007)، نقش نوع تغذیه را در توسعه کارست این چنین بیان کرده‌اند که تغذیه نقطه‌ای و متمرکز باعث به وجود آمدن مجاری بزرگ کارستی و رودخانه‌های زیرسطحی می‌شود اما تغذیه‌ی پراکنده فقط باعث افزایش خلل و فرج انحلالی کوچک شده و تأثیر کمتری در توسعه مجاری بزرگ دارد.

۲-۹-۲- دما

با افزایش دما، ظرفیت انحلال گاز کربنیک (CO_2) در آب کاهش یافته و در نتیجه خوردگی آب نیز کاهش می‌یابد. به طور کلی پایین بودن زیاد دما باعث ایجاد یخ‌زدگی و کاهش جریان آب، کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش کارستی شدن می‌شود. هم‌چنین در مناطق گرم و خشک به دلیل بالا بودن دما و افزایش میزان تبخیر مانع توسعه کارست می‌شود. افزایش دما بر افزایش پوشش گیاهی منطقه تأثیر مثبت دارد اما این تأثیر مستقیم و خطی نیست، بلکه در حد خاصی از دما بیشترین پوشش گیاهی به وجود می‌آید (Milanovic 1981).

۲-۹-۳- فشار گاز دی اکسید کربن

افزایش میزان فشار گاز دی اکسید کربن در هوا، باعث افزایش خاصیت اسیدی بارش جوی و افزایش انحلال آهک و در نتیجه توسعه یافتگی هر چه بیشتر کارست می شود. افزایش باران های اسیدی با خاصیت خوردگی بیشتر نرخ میزان انحلال سطحی درز و شکاف ها را افزایش می دهد. میزان گاز کربنیک موجود در خلل و فرج به عوامل گوناگون دیگری هم چون پوشش گیاهی، مواد آلی خاک، وجود باکتری های هوازی تجزیه کننده موجود در خاک و فعالیت انسانی وابسته است (Milanovic 1981).

۲-۹-۴- لیتولوژی

لیتولوژی سنگ های آهکی بر روی تخلخل، نفوذپذیری و قابلیت کارستی شدن اثر دارد. وجود سازندهای انحلال پذیر و انحلال در آن ها از عوامل اصلی تشکیل و توسعه کارست است که وابسته به ترکیب سنگ می باشد. کانی های اصلی تشکیل دهنده سنگ های کربناته شامل کلسیت و آراگونیت با ترکیب شیمیایی کربنات کلسیم (CaCO_3) و نیز دولومیت با ترکیب کربنات مضاعف کلسیم و منیزیم ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) می باشند که معمولاً در ساختارهای بلورشناسی هندسی تریگونال و اورتورومبیک متبلور می شوند (موسوی حرمی ۱۳۸۵). آپلو و پوستما (Appelo and Postma 2005) انحلال پذیری دو کانی کلسیت و آراگونیت در آب های طبیعی را با یکدیگر مقایسه کردند و با توجه به نتایج کارهای آنان انحلال پذیری کانی آراگونیت در آب های طبیعی بیشتر از کلسیت می باشد. دولومیت مربوط به سری محلول جامد میان دو کانی کلسیت (CaCO_3) و منیزیت (MgCO_3) است. پژوهش های انجام شده بر رابطه بین سرعت انحلال کربنات با درصد اکسید کلسیم (CaO) نشان می دهد هر چه نسبت اکسید کلسیم (CaO) به اکسید منیزیم (MgO) بیشتر باشد قابلیت انحلال بیشتر است اما مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که بیشترین سرعت انحلال کربنات هنگامی صورت می گیرد که تا سه درصد اکسید منیزیم (MgO) در ترکیب آن موجود باشد، این مقدار اکسید منیزیم باعث تغییر وضعیت بلور

کلسیت و افزایش سطح تماس و افزایش انحلال می‌شود (Raush and White 1970 cited in Ford and Williams 2007 سنگ‌های کربناته توسط دو مکانیسم عمده شیمیایی و بیوشیمیایی تشکیل می‌شوند، سیمان تشکیل شده در بین ذرات از نظر میزان و جنس بسته به مکانیسم تشکیل متغیر است. میزان و جنس سیمان بر شدت انحلال و توسعه کارست اثر دارد. آهک در مقایسه با دولومیت، تمایل و توانایی بیشتری به توسعه مجاری کارست دارد. آهک ماسه‌ای نسبت به آهک خالص بیشتر کارستی می‌شود اما آهک شیلی دارای مجاری و عوارض کارستی سطحی کمتری است (Ashjari and Raeisi 2006).

۲-۹-۵- چینه‌شناسی

چینه‌شناسی، مطالعه توالی سنگی بر طبق خواص مختلف سنگ مانند سن نسبی، محتوای فسیلی و یا واحدهای سنگ چینه‌ای می‌باشد. در صورتی که سازندهای کربناته ضخامت و گسترش قابل توجهی داشته باشند، امکان تشکیل آبخوان‌های کارستی بیشتر می‌شود. فاکتورهای چینه‌شناسی که در توسعه کارست نقش دارند عبارتند از:

الف) لایه‌بندی و ضخامت لایه: بیش‌ترین توسعه کارست در آهک‌های ضخیم لایه مشاهده می‌شود اما انحلال سنگ‌های نازک لایه در همان شرایط پراکنده است (Goldscheider and Drew 2007). لایه‌های ضخیم دارای شکستگی‌های طولانی هستند که مجاری مستقیم برای جریان سیال به وجود می‌آورند و لایه‌های نازک دارای شکستگی‌های کوتاه و متقاطع هستند که در یک صفحه قرار نمی‌گیرند و مسیرهای پرپیچ و خم را به وجود می‌آورند که جریان سیال در این مسیرهای پرپیچ و خم آهسته است و نفوذپذیری سنگ کاهش پیدا می‌کند (Tsang 1984 Cited in cooke et al 2004). شیب زیاد لایه‌بندی می‌تواند آب را به اعماق بیشتر و جاهایی که درز و شکستگی توسعه نیافته‌اند، انتقال دهد و باعث توسعه کارست در عمق شود. جهت شیب لایه‌بندی نسبت

به توپوگرافی بر میزان نفوذ آب‌های سطحی به زیر زمین و در نتیجه توسعه کارست اثر می‌گذارد (شمسی ۱۳۹۰).

ب) توالی چینه‌شناسی: توالی چینه‌شناسی سازندها ممکن است به صورت‌های مختلفی در انحلال و توسعه کارست تأثیرگذار باشد. اختلاف در نفوذپذیری دولایه هم‌جوار امکان اثرگذاری بر روی جهت‌گیری جریان و توسعه جهت‌دار کارست را فراهم می‌کند. در سنگ‌های کربناته برخی از ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی و چینه‌شناسی توسط فرآیند کارستی شدن رشد کرده و شبکه غارها و مجاری را تشکیل می‌دهند. توالی چینه‌شناسی سازندها ممکن است به صورت‌های مختلفی در انحلال و توسعه کارست تأثیرگذار باشند. قرارگیری سازندهای نفوذناپذیر بر روی سازندهای انحلال‌پذیر، مانع از رسیدن آب به آن و در نتیجه کاهش انحلال و توسعه کمتر سازند می‌شود، وجود سازندهای انحلال‌پذیر اما خردشده بر روی سازند انحلال‌پذیر منجر به ایجاد منطقه اشباع موقت و روند تدریجی نفوذ و توسعه پدیده‌های کارستی همانند چاهک‌ها می‌شود که در ادامه به ایجاد مجاری بزرگ کارستی منجر می‌شود. قرارگیری یک سازند زمین‌شناسی با قابلیت انحلال بالا بین دو سازند نفوذناپذیر، که سبب جریان ترجیحی آب در لایه با نفوذپذیری بالا و انحلال بیشتر و توسعه بیشتر آن می‌شود (شکری ۱۳۹۰). همگن بودن توده سنگ کربناته و عدم حضور لایه‌های با نفوذپذیری متفاوت، باعث توسعه یکنواخت کارست در توده سنگ می‌گردد (White and White 2001).

۲-۹-۶- عوامل تکتونیکی

به طور کلی تکتونیک موجود در یک منطقه با ایجاد گسل خوردگی، درزه و شکستگی، بالا آمدگی و شیب‌دار کردن لایه‌ها، چین خوردگی و افزایش تخلخل ثانویه نقش مؤثری را در توسعه کارست ایفا می‌نماید. در اینجا اشکال ساختاری ناشی از تکتونیک و نقش آنها در توسعه کارست به طور مختصر ارائه می‌شوند:

الف) **چین خوردگی**: شکل چین خوردگی و گسترش آبخوان، ذخیره‌سازی و شبکه زهکشی زیرزمینی آبخوان

را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساختمان چین بر روی سیستم زهکشی زیرزمینی به ویژه در آبخوان کم‌عمق که سیستم زهکشی تحت کنترل چینه‌شناسی است، اثر مهمی دارد در مقابل اثر چین‌خوردگی بر روی آبخوان عمیق کارستی کم‌تر است (Goldscheider and Drew 2007). به طور کلی فرض بر این است که کارستی شدن با افزایش عمق کاهش می‌یابد اما در مورد سنگ‌های چین‌خورده این‌گونه نیست. در حالت کلی کارستی شدن در ناودیس‌ها با افزایش عمق زیاد می‌شود اما در تاق‌دیس‌ها با افزایش عمق کارستی شدن کاهش می‌یابد زیرا در نواحی بیرونی چین‌خوردگی، گسل‌های نرمال و درزه‌های باز تشکیل می‌شود و در نواحی داخلی چین‌خوردگی گسل‌های تراستی و درزه‌های بسته تشکیل می‌شوند که این امر در میزان کارستی شدن مؤثر است (Estrella 2002 Cited in Goldscheider and Drew 2007).

(ب) **گسل:** در مطالعات هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی، گسل‌ها دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. کستنینگ (Kastning 1997) گسل‌ها را براساس تأثیر بر جریان آب زیرزمینی به سه دسته تقسیم کرده است: گسل‌هایی با تأثیر مثبت: این گسل‌ها با سیستم شکستگی باز می‌باشند، که در نتیجه نیروهای کششی ایجاد می‌شوند و در جریان آب زیرزمینی تأثیر گذار می‌باشند. گسل‌هایی با تأثیر منفی: در نواحی که توده آهک در صفحه گسلی تحت تأثیر فشار قرار گیرد و آهک تبلور مجدد یا میلونیتی می‌شود و باعث ممانعت از جریان یا مسدود شدن و انحراف جریان آب زیرزمینی می‌شود. گسل‌های بدون تأثیر: این گسل‌ها در جریان آب زیرزمینی نقش ندارند. تأثیر هیدرولوژیکی گسل‌ها وابسته به عرض بازشدگی صفحه گسل، وجود یا عدم وجود مواد پرکننده و مقدار جابه‌جایی گسل است (Herold et al 2000 Cited in Goldscheider and Drew 2007). منطقه گسلی در شرایطی که نفوذپذیری آن بیشتر از سنگ میزبان باشد و یا جهت آن در جهت شیب هیدرولیکی باشد، می‌تواند به عنوان مسیر ترجیحی مهمی جهت انتقال آب مورد توجه قرار گیرند. مطالعات نشان داده که گسل‌های فعال به طور عمده جریان آب زیرزمینی در سنگ بستر را کنترل می‌کنند (Gudmundsson 2000).

۲-۹-۷- توپوگرافی

توپوگرافی به طور مستقیم و یا به صورت غیرمستقیم با اثر بر عوامل دیگر بر توسعه کارست نقش خود را ایفا می‌کند. مهم‌ترین اثر توپوگرافی این است که سطح اساس فرسایش محلی را مشخص می‌نماید سطح اساس توپوگرافی تعیین‌کننده‌ی محل تخلیه و جهت تخلیه می‌باشد. سطح اساس فرسایش در فهم انحلال و فرآیند توسعه کارست مهم است و ممکن است که سطح دریا، یک رودخانه دائمی آبگیر و یا یک لایه نفوذناپذیر در زیر آبخوان کربناته باشد (Ashjari 2007). در حالت عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌ها به طرف سطح اساس می‌باشد و تمام آبخوان به سمت آن زهکشی می‌شود. اگر چه سنگ‌شناسی، ساختارهای تکتونیکی و گسل‌ها عامل‌های مهمی در کنترل جهت جریان آب زیرزمینی هستند اما اثر سطح اساس فرسایش در نهایت در کنترل جریان نقش اساسی و مهم‌تر ایفا می‌کنند (Ford and Williams 1989). وایت (White 1988) یکی از پارامترهای فیزیکی در توسعه کارست را اختلاف ارتفاع می‌داند که نقش مؤثری در میزان وقوع بارندگی، تبخیر و تعرق، دما و وضعیت پوشش گیاهی دارد که پوشش گیاهی به نوبه خود از عوامل مؤثر در مقدار نفوذ و رواناب است. فورد و ویلیامز (Ford and Williams 2007) ذکر کرده‌اند که در مناطق دارای شیب بیش از ۲۰ درجه جریان زیرسطحی و شیب هیدرولیکی در اغلب موارد با شیب توپوگرافی تقریباً موازی است. در نتیجه در جاهایی که شیب توپوگرافی کم است شیب هیدرولیکی هم کم می‌باشد. در جاهایی که شیب بیش از ۳۰ درجه است، رواناب زیادتر و مقدار نفوذ کمتر می‌باشد. شیب زیاد مانع از ایجاد پوشش خاک به صورت ضخیم و رشد پوشش گیاهی شده و در نتیجه میزان نفوذ و تغذیه و توسعه کارست بیشتر است.

۲-۹-۱- پوشش خاک و پوشش گیاهی

در مناطق کارستی که سطح آهک توسط خاک پوشیده شده باشد، نرخ نفوذ آب به درون آهک توسط خاک

کنترل می‌شود در غیر این صورت قابلیت انتقال آهک در جهت عمودی نرخ نفوذ را کنترل می‌کند. نفوذپذیری خاک به عوامل زیادی از قبیل بافت، ساختمان، حفره‌های ایجاد شده و میزان هوموس بستگی دارد. ضخامت خاک‌های پوشاننده سنگ‌های کربناته از نظر نگه‌داشت رطوبت اهمیت بسزایی دارد. خاک دانه درشت نسبت به خاک دانه ریز در نفوذ آب مؤثرتر است و آب کمتری را در خود ذخیره می‌کند. چنانچه ذرات خاک دانه ریز بوده و ضخامت آن قابل توجه باشد از میزان آب نفوذی کاسته می‌گردد. علاوه بر آن خاک‌های رسی با پر کردن درز و شکاف‌ها سبب کاهش نفوذپذیری و انتقال آب به اعماق می‌شوند. همچنین خاک در جهت فراهم آوردن محیطی جهت رویش گیاهان نیز دارای اهمیت است (کریمی وردنجانی ۱۳۸۹). گیاهان هم تأثیر مثبت و هم تأثیر منفی در توسعه کارست دارند. فشار ریشه گیاهان سبب تخریب و شکستگی سنگ‌ها و ایجاد فضای نفوذپذیر در کنار آن می‌شود. وجود برگ گیاهان، هوموس خاک را افزایش می‌دهد و افزایش CO₂ حاصل از تنفس ریشه‌ها باعث افزایش اسیدیته و افزایش انحلال سنگ‌های کربناته می‌شود. ممانعت از فشرده شدن خاک و ایجاد رواناب‌های سطحی و در نتیجه افزایش نفوذ این جریان‌ات و همچنین ایجاد سایه و جلوگیری از تابش مستقیم خورشید بر خاک و کم شدن تبخیر از تأثیرات مثبت پوشش گیاهی در توسعه کارست می‌باشد. اما از سوی دیگر پوشش‌های گیاهی متراکم و انبوه به ویژه درختی از رسیدن آب‌های جوی به سطح زمین ممانعت می‌کند و این آب‌ها مستقیماً از سطح برگ‌ها و شاخه درختان تبخیر و مجدد به جو برمی‌گردد (شکری ۱۳۹۰).

۲-۹-۹- آبراهه

آبراهه‌ها در سطح زمین به عنوان محل عبور آب از ارتفاعات به پایین‌دست به شمار می‌روند و می‌توانند در نفوذ آب به درون زمین مؤثر باشند، به خصوص اگر در مناطق کم شیب و در محل عبور گسل‌ها یا درزه‌های بزرگ تشکیل شده باشند، چرا که آب هنگام عبور از آنها فرصت نفوذ به درون زمین را پیدا می‌کند. این وضعیت در

آبراهه‌های رده بالاتر که حجم بیشتری از آب را در مدت زمان طولانی‌تر دریافت می‌کنند نمایان‌تر و پراهمیت‌تر می‌باشد. اما واضح است که شبکه‌های زهکشی متراکم، بیان‌گر تغذیه کمتر در زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه است (Shaban et al 2006).

۲-۱۰- تعیین حوضه آبرگیر در چشمه‌های کارستی

تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی یکی از پارامترهای مهم و دشوار در نواحی کارستی می‌باشد. از این رو، جهت تشخیص دقیق مرزهای حوضه آبرگیر در این چشمه‌ها، تحقیقات زمین‌شناسی مفصل و محاسبات هیدروژئولوژیکی نسبتاً وسیعی مورد نیاز است. منظور از حوضه آبرگیر، ناحیه‌ای است که تمامی نقاط روی این حوضه در رساندن آب به نقطه‌ی خروجی یا چشمه سهمیم می‌باشند (Bonacci and Andric 2015). ریاحی پور و کلانتری (۱۳۸۷)، به مطالعه‌ی تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی پیرغار در دامنه‌ی شمالی کوه سالدوران در ۳۰ کیلومتری جنوب غرب شهرکرد پرداختند. آن‌ها با بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه‌ی کارستی مورد مطالعه و هم‌چنین بررسی‌های هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی، حوضه آبرگیر و محدوده‌ی احتمالی تأمین‌کننده‌ی آبدهی این چشمه‌ها را مشخص نمودند. رحیمی دهکردی و همکاران (۱۳۹۲)، به مطالعه‌ی حوضه آبرگیر چشمه کارستی پیرغار و سراب باباحیدر در دامنه‌ی شمالی کوه سالدوران در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. آن‌ها با بررسی‌های هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی، حوضه آبرگیر و محدوده‌ی احتمالی تأمین‌کننده‌ی آبدهی این چشمه‌ها را تعیین نمودند. کریمی و همکاران (Karimi et al 2005)، با استفاده از سری زمانی پارامترهای فیزیکوشیمیایی و هیدروگراف چشمه‌های کارستی تاقدیس پودنو در دامنه‌ی جنوبی رشته کوه‌های زاگرس، به تعیین حوضه آبرگیر احتمالی این چشمه‌ها پرداختند. آن‌ها هم‌چنین به منظور ارزیابی دقیق‌تر منشأ احتمالی چشمه‌های مذکور از وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی، ژئومورفولوژی، لیتولوژی آبخوان‌های کارستی و سازندهای دربرگیرنده‌ی آن‌ها، ارتفاع سطح آب در پیزومترها و موازنه‌ی آبی آبخوان‌های

کارستی نیز استفاده نمودند. اشجاری و رئیسی (Ashjari and Raeisi 2006)، ضمن مطالعات انجام یافته بر روی

۷۲ تاقدیس کارستی در زاگرس، فرضیاتی را جهت تعیین محل تقریبی حوضه آبریز چشمه‌ی کارستی تعیین

نمودند که به شرح زیر است:

الف- حوضه آبریز در نزدیک‌ترین فاصله از خروجی چشمه قرار می‌گیرد.

ب- ارتفاع تمام نقاط حوضه آبریز بایستی از ارتفاع محل خروجی چشمه بیشتر باشد.

ج- هیچ مرز نفوذناپذیری حوضه آبریز را قطع نکند.

د- میزان ورودی و خروجی از هر حوضه برابر باشد.

ه- خصوصیات ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و تکتونیکی باید با حوضه تعیین شده مطابقت داشته باشد.

و- پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب با سنگ‌شناسی آبخوان کارستی و سازندهای مجاور هم‌خوانی

داشته باشد. روشی که در مراحل مقدماتی تعیین مساحت حوضه آبریز و محدوده لایه آبدار به کار می‌رود،

استفاده از وضعیت زمین‌شناسی، توالی چین‌ه‌شناسی، بیلان و رفتار هیدرولوژیکی منطقه است. هرچند که این

روش نمی‌تواند به صورت دقیق حوضه آبریز را تعیین کند اما با تقریب ۷۰ درصد، محدوده را مشخص می‌کند.

برای تعیین مساحت حوضه آبریز چشمه‌ها دو روش ارائه گردیده است (کریمی ۱۳۷۶). با روش اول که به روش

بده وزنی معروف است، مساحت حوضه آبریز چشمه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$a = \frac{q \cdot A}{Q} \quad \text{معادله (۳-۲)}$$

در این رابطه a مساحت حوضه آبریز چشمه، q بده متوسط، A مساحت کل رخنمون سیستم لایه آبدار و Q

بده متوسط سالیانه کل چشمه‌ها می‌باشد. در روش دیگر مساحت حوضه آبریز مربوط به هر چشمه با استفاده از

رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_B = I \cdot A \cdot \rho \quad \text{معادله (۴-۲)}$$

در این رابطه A مساحت حوضه آبرگیر برحسب کیلومترمربع، p متوسط بارندگی منطقه به میلی متر که با استفاده از رابطه بارندگی ارتفاع به دست می آید، I درصد نفوذ بارندگی و Q_B نیز میزان تخلیه چشمه ناشی از بارندگی های سال بیلان می باشد.

۲-۱۱- هیدروگراف و منحنی فرود چشمه های کارستی

هیدروگراف (Hydrograph) نموداری است که تغییرات زمانی سطح آب یا بده جریان را نشان می دهد (Linsley et al. 1988). شکل هیدروگراف ثبت شده در چشمه ها یگانه بازتاب پاسخ آبخوان در برابر تغذیه است، به ویژه شکل و نرخ منحنی فرود، اطلاعات با معنی از ذخیره و خصوصیات ساختاری سیستم تأمین کننده ی آب چشمه را فراهم می سازد. از این رو تجزیه و تحلیل منحنی آبنمود و فرود چشمه ها دیدگاه مناسبی بر درک طبیعت و عملکرد زهکش های سیستم کارستی می باشد (مرادی ۱۳۸۹). از آنجایی که در یک سیستم کارستی دو نوع جریان آشفته و خطی اتفاق می افتد، از طریق مطالعه ی هیدروگراف چشمه های کارستی می توان سهم هر یک از این دو نوع جریان را در منطقه ی مورد مطالعه برآورد نمود (سامانی و زارعی ۱۳۸۵، Karami 2002). با تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه ها می توان ضریب بده (Discharge coefficient)، حجم ذخیره ی دینامیکی (Dinamic storage) و ارتفاع معادل ستون آب در یک لایه آبدار کارستی را محاسبه نمود. مطالعه ی هیدروگراف چشمه های کارستی هم چنین اطلاعاتی راجع به ویژگی های ذخیره ای، نوع محیط متخلخل، نوع جریان، میزان حجم تخلیه در زمان های مختلف و پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان فراهم می کند (Amit et al 2002). علاوه بر این ها به کمک بررسی منحنی فرود چشمه های کارستی می توان به اطلاعات مهمی در مورد ویژگی های آبخوان هم چون خصوصیات ذخیره سازی و پتانسیل زهکشی، درجه ی کارستی شدن و دیگر ویژگی های هیدروژئولوژیکی دست یافت (Bagheri et al 2016). میلانویچ (Milanovic)، در مطالعه ی سفره کارستی امبلا (Ombla)، در کشور یوگسلاوی، منحنی فرود چشمه

را تهیه نمودند. این منحنی سه رژیم جریان را برای سفره کارستی نشان داده و ضرایب بده آن به ترتیب $\alpha_1 = 0/13$ ، $\alpha_2 = 0/0378$ ، $\alpha_3 = 0/0058$ ، به دست آمد. در رژیم اول تخلیه‌ی مخزن از طریق مجاری بزرگ در حدود ۷ روز و رژیم دوم حدود ۱۳ روز طول کشیده است. ضریب α_1 خروج سریع آب از طریق کانال‌ها و غارها را نشان می‌دهد. ضریب α_2 نشان‌دهنده‌ی خروج آب از درزها و شکاف‌های بزرگ است. ضریب α_3 نیز بیان‌گر خروج آب از ذخایری است که بستگی به خصوصیات هیدروژئولوژیکی محلی داشته و بدون نظم در کل سفره‌ی کارستی پخش گردیده‌اند. این آب‌ها در محیط متخلخل حاصل از درزه‌ها (Fissure Prosimy). مواد شنی و رسی که در کانال‌ها و غارهای فسیلی رسوب کرده‌اند و نیز بخش‌های سیفونی کانال‌ها ذخیره شده‌اند. کرانجک و همکاران (Karanjac et al 1980)، چشمه‌های کارستی زیادی را در محل سد اویمپینار (Oymapinar) در ترکیه مورد مطالعه قرار دادند. ضرایب منحنی فرود ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ در قسمت ابتدایی و از ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ تغییر می‌کند. جریان آب از طریق کانال‌های بزرگ کارستی و غارهای متصل به هم صورت می‌گیرد. بخشی از منحنی فرود که ضرایب از ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ متغیر است، جریان آب زیرزمینی از طریق درزه‌ها و شکاف‌های متصل به هم انجام می‌شود که نسبتاً آهسته زهکشی می‌شوند. ودیعتی و همکاران (۱۳۹۴)، چشمه‌ی کارستی پیرغار در جنوب غرب شهرستان فارس را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به هیدروگراف و سه ضریب فرود تشکیل شده در آن دریافتند که α_1 و α_2 نشان‌دهنده‌ی جریان سریع و α_3 نشان‌گر جریان پایدار یا افشان می‌باشد α_1 . نشان‌دهنده‌ی تخلیه‌ی سریع از مجاری کانالی و حفره‌ای، α_2 تخلیه از مجاری، شکستگی‌ها و درزه‌های ریز و α_3 نیز بیان‌گر جریان افشان می‌باشد. براساس محاسبات صورت گرفته، حدود ۶۰ درصد از جریان کل چشمه پیرغار به عنوان جریان سریع و مابقی آن به عنوان جریان پایه در نظر گرفته شده است. میرحسینی و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی منحنی فرود و تعیین حوضه آبریز چشمه کارستی زاو در منطقه‌ی کلاله واقع در استان گلستان پرداختند. براساس ضریب فرود چشمه درمی‌یابیم که این چشمه از یک بستر تکامل یافته‌ی کارستی تغذیه

می‌شود و نیز جریان سریع (مجرایبی) به پایه (افشان) غلبه دارد که این موضوع بیان کننده‌ی بالا بودن توسعه‌ی کارست در حوضه آبگیر این چشمه است.

۲-۱۲- کاربرد ایزوتوپ پایدار اکسیژن و هیدروژن در مطالعات سیستم‌های کارستی

ایزوتوپ‌های محیطی به طور معمول در مطالعات ژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی به کار گرفته می‌شوند. ایزوتوپ‌های پایدار ($\delta^{18}O$ و δ^2H) در آب به طور گسترده به عنوان ردیاب‌های طبیعی در درک فرآیندهای هیدروژئولوژیکی نظیر بارش، تغذیه‌ی آب زیرزمینی، ارتباط بین آب‌های سطحی و زیرزمینی و هیدرولوژی حوضه آبریز مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار ($\delta^{18}O$ و δ^2H) در طبیعت تقریباً مشابه با ترکیب آن‌ها در آب‌های جوی باقی می‌ماند که این به معنای ثبت شرایط اولیه‌ی تشکیل آب‌های جوی است و می‌تواند به عنوان یک ردیاب طبیعی پایدار به کار گرفته شود. بر این اساس، بعد از جمع‌آوری اطلاعات آب جوی و ایزوتوپ‌های پایدار ($\delta^{18}O$ و δ^2H) و تحلیل ساختار هیدروژئولوژیکی و جریان آب زیرزمینی در منطقه هدف، می‌توان شرایط نواحی تغذیه‌ای آب زیرزمینی و منابع مختلف تغذیه‌ای را تعیین کرد (Clark and Fritz 1997). علاوه بر این مطالعه‌ی این ایزوتوپ‌ها می‌تواند در شناسایی نواحی مختلف تغذیه‌ی آبخوان به ما کمک کند. به دلیل پیچیده بودن آبخوان‌های کارستی، داده‌های ایزوتوپی قادر است که برخی از اطلاعات مهم کارست را در اختیار بگذارد. این داده‌ها می‌توانند بسیاری از اطلاعات لازم در مورد سفره‌های کارستی نظیر منشأ و سن آب‌های کارستی و همچنین سنگ‌های دربرگیرنده‌ی آن‌ها را مشخص سازند. مبنای استفاده از ایزوتوپ‌های محیطی در منابع آب، با کمک بررسی تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار $\delta^{18}O$ و δ^2H در منابع آبی و مقایسه‌ی آن نسبت به میانگین غلظت ایزوتوپ‌های محیطی در نزولات جوی و منطقه می‌باشد. با بررسی

تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های $2H\delta$ و $\delta^{18}O$ در منابع آب سطحی و زیرزمینی و مقایسه‌ی آن نسبت به میانگین غلظت این دو ایزوتوپ در آب باران منطقه، می‌توان فرآیندهای تأثیرگذار بر چرخه‌ی هیدروژئولوژیک را ردیابی نمود. علاوه بر این با مطالعه‌ی ایزوتوپ‌های پایدار می‌توان به ارتفاع تغذیه در چشمه‌های کارستی، مناطق تغذیه‌ی آبخوان‌ها (Mazor 2004)، تشخیص زمان پاسخ حوضه آبریز به بارش، تشخیص آبخوان‌های سطحی و عمقی از یکدیگر (Clark 2015)، و همچنین تعیین نوع تغذیه و سیستم جریان آب در مجاری کارستی (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹) پی برد. ایزوتوپ‌های پایدار $2H\delta$ و $\delta^{18}O$ به عنوان ردیاب‌های طبیعی واقع در مولکول‌های آب بوده که تغییرات چرخه‌ی آب را با دقت بالایی از ابتدا تا انتهای چرخه در خود ثبت می‌نمایند. زمانی که آب دست‌خوش تغییر فاز و اختلاط در چرخه می‌شود، نسبت ایزوتوپی نیز تغییر می‌کند.

مقایسه‌ی ترکیبات ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن (^{18}O) و ($2H$) موجود در آب حاصل از بارندگی و آب زیرزمینی کارستی می‌تواند یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی مکانیسم تغذیه باشد (Yeh et al., 2011). کیل و همکاران (2007)، ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن را در بارش‌ها و آب زیرزمینی بررسی نموده و به اطلاعاتی در مورد ترکیب‌های ایزوتوپی در فصل بارش و همچنین محل‌های تغذیه آب زیرزمینی دست یافتند. در این تحقیق، میزان غنی‌شدگی ایزوتوپ‌های پایدار به عنوان تابعی از ارتفاع معرفی شده و نقاط تغذیه‌ی آب زیرزمینی تعیین شده است. باقری و همکاران (۱۳۸۶)، برای تعیین منشأ چشمه‌های کارستی تاکدیس راوندی در بالادست سد سیمره، از ایزوتوپ‌های پایدار هیدروژن و اکسیژن استفاده کردند و با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و نتایج مطالعات ایزوتوپی چشمه‌های منطقه، منشأ چشمه‌ها را تعیین نمودند.

(Mandic et al. 2008)، توانستند با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار، اطلاعات مهمی را در رابطه با میانگین ارتفاع مناطق تغذیه چشمه‌های اصلی حوضه آبریز رودخانه‌ی گاگاکرواسی به دست آورند.

(Schwarz et al. 2009)، با مقایسه‌ی ترکیبات ایزوتوپی بارندگی و تخلیه آب زیرزمینی، اختلاط بین بخش‌های مختلف مخازن آب زیرزمینی یکی از شناخته شده‌ترین و بزرگ‌ترین مناطق کارستی آلمان را مورد ارزیابی قرار دادند.

مارکوس و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از داده‌های ایزوتوپی عواملی چون منشأ تغذیه، اختلاط آب، برهم کنش آب و سنگ، سن نسبی و مطلق و نوع جریان را در آبخوان کارستی واقع در بخش مرکزی کشور پرتغال تعیین کردند.

مصطفی و همکاران (۲۰۱۵)، در نزدیکی دو محدوده‌ی پاوه و جوانرود در کشور عراق با توجه به داده‌های ایزوتوپی و هیدروژئوشیمی، آبخوان‌های تغذیه کننده‌ی منابع را مشخص کرده و رابطه‌ی بین بارش و پارامترهای ایزوتوپی را به کمک رسم خط ایزوتوپ محلی در کردستان عراق به دست آوردند.

مینگ و لیو (Meng and Liu, 2016)، خصوصیات ایزوتوپی بارندگی، آب حاصل از ذوب، آب رودخانه و منابع آب زیرزمینی را مورد مقایسه قرار دادند و به نتایج ارزشمندی دست یافتند.

رفیق‌دوست و همکاران (۱۳۹۵)، جهت تعیین منشأ آب به مطالعه‌ی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در چشمه‌های منطقه‌ی تنگ بیجار واقع در غرب استان ایلام پرداختند. این مطالعات نشان می‌دهد که آب چشمه‌های منطقه، مستقیماً از نزولات جوی منشأ گرفته و به دلیل آن که منطقه از نظر آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، تبخیر و تفکیک ایزوتوپی در آن تأثیر بسزایی داشته است.

محمدی بهزاد و همکاران (۱۳۹۵)، به ارزیابی منابع تغذیه‌ی چشمه‌های کارستی مهم استان خوزستان به کمک ایزوتوپ‌های پایدار پرداختند. از این رو محتوی ایزوتوپ‌های پایدار تمامی منابع آب موجود در منطقه‌ی تغذیه و تخلیه طی دو دوره تر و خشک تعیین گردید. سپس با استفاده از این نتایج ایزوتوپی و خط آب جوی محلی به

بررسی منشأ تغذیه چشمه‌های منطقه هدف پرداخته شده و ارتفاع منطقه‌ی تغذیه و سهم تغذیه احتمالی این چشمه‌ها از منابع آب موجود در منطقه تعیین گردید.

فصل سوم:

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی دقیق و جامع هر مطالعه، جمع‌آوری و کسب اطلاعات از محدوده‌ی مطالعاتی امری مهم و ضروری می‌باشد. بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی تخت سلیمان توسط مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی انجام گرفت. به طور کلی در این پژوهش، موارد زیر انجام شده است:

- جمع‌آوری آمار و اطلاعات هواشناسی و زمین‌شناسی
- بازدیدهای صحرایی به منظور بررسی توسعه‌ی کارست
- نمونه‌برداری از چشمه‌های منطقه
- آنالیز عناصر اصلی نمونه‌ها در آزمایشگاه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست محیطی
- انجام آنالیز ایزوتوپی نمونه‌ها در سازمان انرژی اتمی
- ارزیابی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی نمونه‌ها و مطالعه‌ی کمی و کیفی آنها با استفاده از داده‌ها و نتایج آنالیزهای شیمیایی
- تعیین مساحت حوضه آبریز چشمه‌ی کارستی منطقه
- تعیین میزان تغذیه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)
- موارد ذکر شده به صورت جداگانه و به طور مختصر شرح داده خواهد شد

۳-۱- جمع‌آوری آمار و اطلاعات

جهت بررسی‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی در یک منطقه، اولین گام جمع‌آوری آمار و اطلاعات موجود در رابطه با آن می‌باشد. در اینجا نیز به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی تخت سلیمان، اطلاعات زیر جمع‌آوری گردید:

- جمع‌آوری آمار بارش و درجه حرارت مربوط به منطقه‌ی تخت سلیمان از سازمان هواشناسی ارومیه جهت ترسیم نمودار بارش و ارتفاع منطقه

۳-۲- باز دیدهای صحرایی

جهت بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی یک منطقه بایستی زمین‌شناسی آن مورد مطالعه قرار گیرد که این امر توسط نقشه‌های زمین‌شناسی میسر می‌گردد. از این رو، برای شناسایی منطقه‌ی مورد مطالعه از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان استفاده شده است. نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه نیز با استفاده از نقشه‌ی ذکر شده و باز دیدهای صحرایی صورت گرفته در نرم‌افزار Arc GIS ترسیم و رقومی گردید. در بررسی‌های ژئومورفولوژی کارست سعی شده تا با ارزیابی درصد پوشش خاک، نوع بارش و عوارض کارستی و نیز درصد تغذیه‌ی سالانه‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه برآورد شده و توسعه‌ی کارست در محدوده‌ی حوضه آبرگیر بررسی گردد.

۳-۳- نمونه برداری از چشمه‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه نمونه‌برداری طی ۷ ماه از اسفند ۹۷ تا شهریور ۹۸ و در ۴ محل انجام گرفت. از هر محل دو نمونه یکی برای آنالیز هیدرووشیمیایی و اندازه‌گیری کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی و یکی جهت اندازه‌گیری ایزوتوپی برداشته شد. هنگام نمونه‌برداری از چشمه‌ها، جهت جلوگیری از هر آلودگی ظروف نمونه قبل از عمل نمونه‌برداری سه مرتبه با آب چشمه‌ها شستشو گردید. ظروف نمونه از آب چشمه پر شده و درب نمونه‌ها محکم بسته شد سپس اطلاعاتی چون محل و زمان نمونه‌برداری به همراه نام نمونه‌ها نیز بر روی هر بطری درج گردیده و به آزمایشگاه آب و زمین‌شناسی زیست محیطی واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود انتقال داده شد که حداکثر تا ۴۸ ساعت بعد مورد آنالیز شیمیایی قرار گیرد.

۳-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه‌ها

در محل نمونه‌برداری خصوصیات فیزیکی شامل دبی و درجه حرارت آب و خصوصیات شیمیایی هم‌چون هدایت الکتریکی (EC) و pH اندازه‌گیری شد. روش اندازه‌گیری این خصوصیات به طور مختصر ارائه می‌گردد.

۳-۴-۱- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

یکی از مهم‌ترین خصوصیات شیمیایی آب، هدایت الکتریکی می‌باشد چرا که این پارامتر با املاح جامد حل شده در آب (TDS) رابطه‌ی مستقیم دارد. جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در نمونه‌های آب منطقه از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (EC) مدل WP-84 ساخت آمریکا در محل نمونه‌برداری استفاده گردید (شکل ۳-۱).

۳-۴-۲- اندازه‌گیری pH

مقدار (pH) آب به عواملی نظیر مقدار دی‌اکسیدکربن محلول در آب، مقدار آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات و هم‌چنین درجه حرارت آب وابسته است. هر چه مقدار دی‌اکسید محلول در آب افزایش یابد، از مقدار pH کاسته می‌شود. مقدار pH در تجزیه و تحلیل داده‌ها، به ویژه در محاسبه‌ی اندیس اشباع کلسیت (SIC) و دولومیت (SID) از اهمیت زیادی برخوردار است از این رو pH نمونه‌های آب چشمه‌های مورد مطالعه در محل به وسیله‌ی دستگاه pH متر سانتکس (Suntex) مدل Sp-701 ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد. دقت این دستگاه برای اندازه‌گیری برابر با یک صدم واحد می‌باشد. لازم به ذکر است که به منظور کاهش میزان خطای اندازه‌گیری ابتدا الکترود دستگاه با آب چشمه‌ها شسته شده و سپس مورد استفاده قرار گرفتند.

۳-۴-۵- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

نمونه‌های برداشت شده از چشمه‌های مورد مطالعه، جهت اندازه‌گیری آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی به آزمایشگاه

آب و زمین‌شناسی زیست محیطی دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل شدند. در آزمایشگاه کاتیون‌هایی نظیر کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم و آنیون‌هایی مانند کربنات، بی‌کربنات، کلر و سولفات اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از نتایج حاصله پارامترهایی چون درصد خطای آزمایش، کل جامدات محلول و سختی کل محاسبه گردید.

۳-۵-۱- اندازه‌گیری آنیون‌ها

۳-۵-۱-۱- اندازه‌گیری یون کربنات (CO_3)

نمونه‌هایی که مقدار اسیدیته‌ی آن‌ها از $\frac{8}{2}$ کم‌تر است، فاقد یون کربنات می‌باشند. با توجه به این که مقدار pH نمونه‌های آنالیز شده در اکثر نمونه‌ها در طی ماه‌های مختلف کم‌تر از این مقدار بود، از این رو یون کربنات در بسیاری از نمونه‌ها موجود نمی‌باشد. اندازه‌گیری این یون با شناساگر فنول فتالئین به روش حجم‌سنجی (Titration) با اسید سولفوریک انجام شد.

۳-۵-۱-۲- اندازه‌گیری یون بی‌کربنات (HCO_3)

جهت اندازه‌گیری یون بی‌کربنات از شناساگر متیل اورانژ و تیترانت اسید سولفوریک $\frac{1}{40}$ نرمال به روش تیتراسیون استفاده شد.

۳-۵-۱-۳- اندازه‌گیری یون کلر (Cl)

جهت آنالیز یون کلر در نمونه‌های مورد بررسی از روش تیتراسیون با نیترات نقره $\frac{0}{1}$ نرمال و شناساگر کرومات پتاسیم ۵ درصد استفاده گردید.

۳-۵-۱-۴- اندازه‌گیری یون سولفات (SO_4)

جهت اندازه‌گیری یون سولفات از دستگاه Hanna مدل HI ۹۳۷۵۱ استفاده شد. بدین صورت که پس از آماده

سازی نمونه‌ها اقدام به اضافه نمودن پودر باریت ($0/143$ گرم) 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. هم‌چنین برای نمونه‌هایی که مقدار سولفات آنها بالاتر از حد استاندارد تعریف شده برای دستگاه سولفات‌سنج مذکور بود، از دستگاه سولفات‌سنج دیگری به نام توربیدی‌متر استفاده شد؛ به این صورت که با رقیق کردن نمونه و گذاشتن آن در دستگاه می‌توان مقدار سولفات را محاسبه کرد.

۳-۵-۲- اندازه‌گیری کاتیون‌ها

۳-۵-۲-۱- اندازه‌گیری یون کلسیم (Ca)

یون کلسیم نیز با استفاده از روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد. که در آن از مروکسید به عنوان معرف و چند قطره KOH (هیدروکسید پتاسیم) 2 نرمال جهت بالا بردن pH نمونه و محلول (EDTA ترکیب سه‌تایی نمک سدیم) به عنوان تیتранت استفاده گردید.

۳-۵-۲-۲- اندازه‌گیری یون منیزیم (Mg)

از آنجایی که روش تیتراسیون مستقیمی جهت اندازه‌گیری یون منیزیم وجود ندارد، ابتدا مجموع یون‌های کلسیم و منیزیم نمونه با استفاده از روش تیتراسیون اندازه‌گیری شده و سپس از مقدار کلسیم به دست آمده کم شد و در نهایت میزان یون منیزیم محاسبه گردید. بنابراین جهت اندازه‌گیری مجموع یون‌های کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون از اریوبلک‌تی (EBT) به عنوان معرف، pH10 (بافر آمونیاکی) جهت افزایش pH و محلول EDTA به عنوان تیتранت استفاده شد.

۳-۵-۳- اندازه‌گیری یون‌های سدیم (Na) و پتاسیم (K)

جهت اندازه‌گیری یون‌های سدیم و پتاسیم از دستگاه نورسنج شعله‌ای (Flame Photometer) استفاده شد (شکل ۳-۴). لازم به ذکر است که قبل از اندازه‌گیری غلظت یون‌های مذکور دستگاه مربوطه با محلول‌های استاندارد کالیبره شده است.

۳-۵-۳- 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 نمونه‌برداری گردد. برای بررسی صحت نتایج، از معادله درصد خطای واکنش استفاده شده است.

$$\text{معادله (۳-۴)} \quad \text{درصد خطا} = \left| \frac{\sum \text{آنیون‌ها} - \sum \text{کاتیون‌ها}}{\sum \text{آنیون‌ها} + \sum \text{کاتیون‌ها}} \right| \times 100$$

در رابطه فوق مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها برحسب میلی‌اکی والان بر لیتر می‌باشد.

۳-۵-۴- سختی کل (Total Hardness)

به منظور محاسبه سختی کل نمونه‌های آب از معادله (۳-۵) استفاده شده است.

$$\text{معادله (۳-۵)} \quad H = 2.5\{\text{Ca}\} + 4.1\{\text{Mg}\}$$

در این معادله (H) سختی کل برحسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم معادل می‌باشد. غلظت منیزیم و کلسیم نیز برحسب میلی‌گرم در لیتر در رابطه وارد می‌شود.

۳-۵-۵- کل مواد جامد محلول (TDS)

جهت محاسبه کل جامدات محلول در آب زیرزمینی از رابطه (۳-۶) استفاده می‌شود.

$$\text{TDS} = \sum \text{Ions} + \text{SiO}_2 \quad \text{معادله (۳-۶)}$$

در این رابطه (TDS)، کل جامدات محلول در آب برحسب میلی گرم بر لیتر می‌باشد.

۳-۶- محاسبه‌ی ضرایب اشباع

اندیس‌های اشباع کلسیت، دولومیت، هالیت و ژیپس چهار پارامتر مهم در تفسیر شرایط هیدروشیمیایی آب‌های چشمه‌های کارستی و دیگر منابع آبی می‌باشند. محاسبه‌ی این پارامترها توسط نرم‌افزار PhreeQc صورت گرفته است. مقادیر بالای صفر در اندیس‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت نشان دهنده حالت فوق اشباع و مقادیر صفر و زیر صفر بیان گر حالت تحت اشباع می‌باشد.

۳-۷- نمودارهای ترکیبی

نمودارهای ترکیبی و دو متغیره به منظور تغییرات یون‌ها نسبت به هم و همچنین فرآیندهای تأثیرگذار بر شیمی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله‌ی این نمودارها می‌توان به نمودارهایی مانند سدیم در برابر کلر، نسبت کلسیم به بی‌کربنات و سولفات، مجموع کلسیم و منیزیم در برابر مجموع بی‌کربنات و سولفات و غیره اشاره نمود.

۳-۸- تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های تخت سلیمان

شناسایی حوضه آبرگیر به منظور تخمین حجم 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 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 بازدهی‌های صحرایی به عمل آمده از محدوده درصد تغذیه سالیانه برآورد شد. با داشتن مساحت حوضه آبرگیر و مقادیر بارش و درصد تغذیه سالیانه، حجم تغذیه سالیانه در حوضه آبرگیر مقدماتی با استفاده از معادله (۹-۳) 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 معادله (۹-۳) حوضه مقدماتی بررسی و در صورت نیاز تصحیحاتی روی آن اعمال گردید.

$$A = \frac{V}{PR} \quad \text{معادله (۹-۳)}$$

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

۳-۹- آنالیز ایزوتوپی

جهت آنالیز ایزوتوپی نیز تعدادی نمونه با رعایت تمام نکات مربوط به نمونه‌برداری برداشت شده و سپس به سازمان انرژی اتمی منتقل گردید.

۳-۱۰- استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تعیین میزان تغذیه

کارهای انجام شده در این مرحله شامل تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز و وزن‌دهی و هم‌پوشانی آن‌ها می‌باشد، که به اختصار توزیع داده می‌شوند. برای انجام این مرحله از این تحقیق ابتدا لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، شیب، جهت شیب، بارش، تراکم خطواره‌ها، تراکم آبراهه‌ها، پوشش گیاهی و عوارض کارستی با استفاده از داده‌های

سنجش از دور، نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه تهیه شده‌اند و با اعمال وزن‌های مناسب میزان تغذیه در منطقه به دست آمد. در زیر نحوه تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای این تحقیق شرح داده شده است.

۳-۱۰-۱- تهیه لایه‌های اطلاعاتی

جهت تهیه لایه‌های اطلاعاتی لازم است اطلاعات جمع‌آوری شده دارای فرمت قابل قبول برای ورود به محیط نرم‌افزار Arc GIS باشند. اطلاعات تصویری مانند نقشه‌ها پس از اسکن نمودن با فرمت JPEG و سایر اطلاعات آماری با فرمت اکسل وارد محیط نرم‌افزار شده است. پس با توجه به نقشه‌های پایه و آمار موجود اقدام به تهیه لایه‌های اطلاعاتی شد. لایه‌های مورد نیاز که باید ایجاد شوند شامل لایه اطلاعاتی جهت شیب (Aspect)، مقدار شیب (Slope)، لیتولوژی، عوارض کارستی مهم، تراکم شکستگی‌ها (Density)، تراکم آبراهه‌ها، مقدار بارش و پوشش گیاهی می‌باشند.

۳-۱۰-۲- طبقه‌بندی لایه‌های اطلاعاتی

جهت ارزیابی مقدار تغذیه در منطقه لازم است لایه‌هایی که طبق عوامل مختلف موثر بر تغذیه تعیین شده‌اند را به یک مقیاس واحد تبدیل نمود. مقیاس بندی این لایه‌ها بر اساس نظرات کارشناسی است. لایه‌های اطلاعاتی به نسبت فواصل مساوی طبقه‌بندی می‌شوند که بیان‌گر این است که هر موقعیت مشخص (هر پیکسل) تا چه میزان برای تغذیه مناسب می‌باشد. ارزش‌های بالاتر به گروه‌های داده می‌شود که دارای اهمیت بیشتر در تغذیه هستند.

۳-۱۰-۳- امتیاز دهی لایه‌های اطلاعاتی

از مهم‌ترین مراحل کار تعیین اهمیت نسبی پارامترهای موثر در تغذیه و وزن‌دهی مناسب به هر یک از آن‌ها

می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی وجود دارد. که در این تحقیق بر اساس دانش کارشناسی یا کارشناس محور صورت گرفت، که مبتنی بر دانش و تجربه کارشناسان است.

۳-۱۰-۴- هم‌پوشانی و تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه معیار

روش‌های مختلفی برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در مطالعات مکانیکی وجود دارد. در این مطالعه از نظر کارشناسی استفاده شده است. جهت اعمال تحلیل‌های تصمیم‌گیری، ارزش‌های موجود در نقشه معیار تغییر داده می‌شود و تبدیل به واحدهایی می‌شوند که قابل مقایسه باشند. وزن هر معیار نشان دهنده‌ی میزان اهمیت و ارزش آن معیار نسبت به سایر معیارها در عملیات مکانیکی است، با توجه به اینکه میزان تاثیر هر پارامتر در هدف مورد نظر متفاوت است، اهمیت این مرحله از کار، قبل از تلفیق نقشه‌های معیار مشخص می‌گردد.

۳-۱۰-۵- وزن دهی

در این روش وزن هر معیار بر اساس اهمیت و نظر کارشناسی در یک مقیاس مشخص برای صفر تا ۱۰ تخمین زده می‌شود.

فصل چهارم:

بررسی خصوصیات هیدروژنولوژیکی و

هیدروژنوشیمیایی چشمه‌های

تخت سلیمان

مقدمه:

آبخوان‌های کارستی غالباً توسط یک یا چند چشمه کوچک و بزرگ تخلیه می‌گردند. بنابراین بررسی رفتار چشمه‌های موجود در این آبخوان‌ها می‌تواند اطلاعات با ارزشی از فرآیندهای تغذیه‌ای، نوع جریان و ظرفیت ذخیره‌سازی و همچنین سایر خصوصیات هیدروژئولوژیکی از این آبخوان‌ها را ارائه دهد (Ford and Williams 2007). در این پژوهش تغییرات آبدهی چشمه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین مطالعاتی بر روی خصوصیات شیمیایی چشمه‌ها نظیر غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی انجام گرفته است. براساس مقادیر دبی اندازه‌گیری شده مربوط به چشمه‌ها طی یک دوره هفت ماهه و ترسیم هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی به بررسی توسعه‌ی کارست در منطقه پرداخته شده است. همچنین در ادامه سعی شده است با استفاده از روش‌ها و اصول اولیه زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ابزارهای سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در تغذیه آب به آبخوان‌های کارستی منطقه تهیه و نیز اقدام به پردازش، وزن‌دهی و هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی شده است. سرانجام با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی به دست آمده در محیط GIS میزان تغذیه منطقه محاسبه شد.

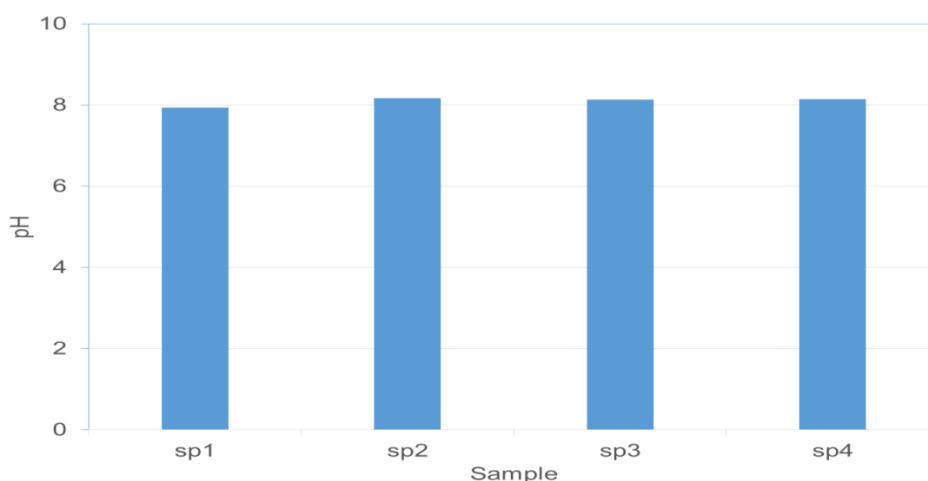
۴-۱- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه

کیفیت منابع آب زیرزمینی متأثر از عوامل مختلف طبیعی و غیرطبیعی است. اثر این عوامل توأم با کاهش نزولات جوی و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌تواند باعث تخریب کیفیت آب این منابع در طولانی مدت گردد. یکی از عوامل اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی، کانی‌شناسی سنگ‌های مسیر عبور آب است. به این معنی که انحلال کانی‌های موجود در سنگ‌های مسیر می‌تواند سبب تمرکز بالایی از عناصر تشکیل دهنده‌ی سنگ‌ها در آب شود (Yuce et al, 2009). علاوه بر این فعالیت‌های انسان‌زاد نیز می‌توانند بر کیفیت آب

زیرزمینی تأثیر گذاشته و باعث تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی شوند. از این رو هرگونه اقدام جهت کنترل و کاهش آلاینده‌های آب زیرزمینی و تأثیرات آن‌ها نیازمند آگاهی کامل از نحوه‌ی تغییرات ویژگی‌های کیفی منابع آب زیرزمینی است.

۴-۲- pH

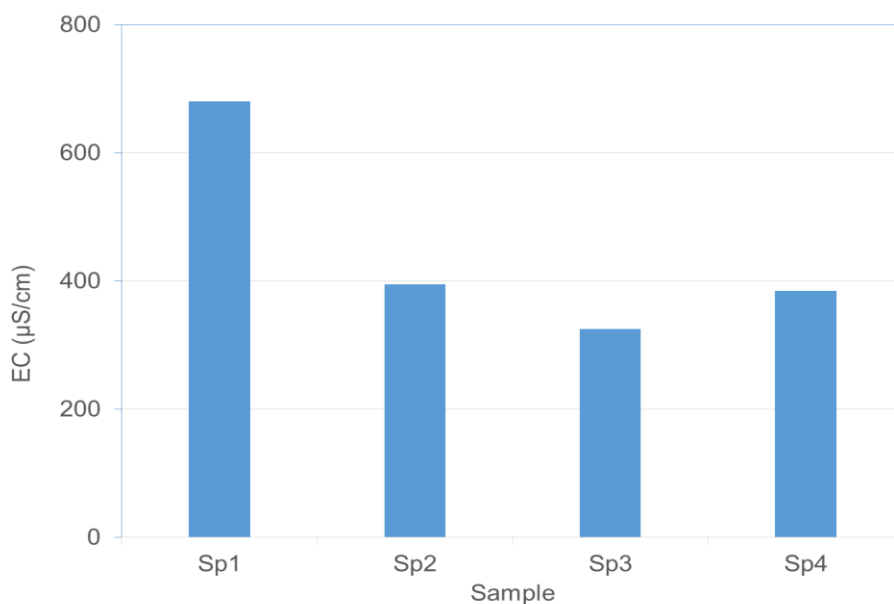
pH پارامتری است که ماهیت اسیدی یا بازی محلول را تعیین می‌کند. pH آب بسته به نوع و کمیت املاح موجود در آب و گازهای حل شده در آب تغییر می‌کند. آب‌های با pH کم معمولاً دارای اسید کربنیک آزاد، هیدروژن سولفور آزاد و اسید هومیک می‌باشند. آب‌های زمین‌های پیریتی یا آتشفشانی دارای اسید کلریدریک و اسید سولفوریک هستند. آب پس از خروج از چشمه در طول زمان تغییراتی را به سبب از دست دادن دی اکسید کربن و یا اکسیداسیون و غیره حاصل می‌کند. در اثر اکسیداسیون سولفورهای آب به سولفات تبدیل و در نتیجه pH آب کم می‌شود و چنان‌چه اسید کربنیک آب از دست داده شود، ازدیاد pH حاصل خواهد شد. بر اساس آنالیزهای انجام شده، pH نمونه‌های آب چشمه تخت سلیمان در حدود ۸/۴ است (شکل ۴-۱). مقدار pH در نمونه‌های برف نیز در حدود ۸ اندازه‌گیری شده است.



شکل ۴-۱: میانگین مقادیر PH در چشمه‌های منطقه

۴-۳- هدایت الکتریکی (EC)

هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity) مربوط به مقدار نمک‌های حل‌شده در آب است و با مجموع املاح محلول در آب رابطه مستقیم دارد. این پارامتر نماینده مناسبی از کل املاح محلول در آب بوده و به آسانی توسط هدایت‌سنج الکتریکی، با دقت بالایی قابل اندازه‌گیری است. عوامل مؤثر بر میزان قابلیت هدایت الکتریکی؛ خصوصیات سنگ شناسی، میزان بارش، شیب و سرعت حرکت آب زیرزمینی می‌باشد. EC با غلظت یون‌ها رابطه مستقیم داشته و مقدار بالای آن در نمونه‌ها هماهنگ با غلظت بالای یون‌های غالب در آب است که در اثر انحلال و یا در اثر تبادل یونی وارد آب شده‌اند. در نمونه‌های آب موجود در منطقه یون‌های کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات غالب هستند که بیش‌ترین عامل تغییردهنده EC نیز به شمار می‌رود. مقادیر EC در چشمه‌های کارستی منطقه بین ۳۸۰ تا ۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر می‌باشد. چشمه تخت سلیمان بیش‌ترین مقدار EC را دارد. مقدار EC در نمونه‌های برف نیز بین ۴۰ تا ۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است.



شکل ۴-۲: میانگین مقادیر EC در چشمه‌های منطقه

۴-۴ - کل مواد جامد محلول TDS

کل مواد جامد محلول (TDS) شامل مجموع مواد جامدی است که در آب محلول است، ولی شامل رسوبات معلق، کلوئیدها و گازهای محلول نمی‌شود. TDS بر حسب میلی گرم در لیتر یا ppm بیان می‌شود. این پارامتر با هدایت الکتریکی رابطه مستقیم دارد. چشمه ۱ دارای بیشترین مقدار TDS (۴۰۰ میلی گرم بر لیتر) و چشمه ۴ دارای کمترین مقدار (۲۵۰ میلی گرم بر لیتر) می‌باشد. تقسیم‌بندی کیفی چشمه‌های منطقه بر اساس پارامتر TDS در جدول ۴-۱ ارائه گردیده و در محدوده آب‌های شیرین قرار گرفته‌اند.

جدول ۴-۱ تقسیم‌بندی کیفی نمونه‌های آب بر مبنای مقادیر TDS (Todd, 2005)

نمونه آب مورد مطالعه	TDS(mg/l)	Water type
Sp1-4	0-1,000	Fresh water
-	1,000-10,000	Brackish water
-	10,000-100,000	Saline water
-	>100,000	Brine

۴-۵ - سختی کل (TH)

مجموع غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم در آب اصطلاحاً سختی کل نام دارد. مقدار سختی کل (بر حسب میلی گرم بر لیتر کربنات کلسیم) از رابطه زیر بدست می‌آید. سختی نمونه‌های چشمه‌ها در جدول ۴-۲ آورده شده است و در محدوده آب‌های سخت قرار دارند. وجود سازندهای کربناته در منطقه باعث افزایش مقدار غلظت یون‌های کربناته و بالطبع سختی آب شده است. با توجه به این که مقدار مجموع کلسیم و منیزیم بیشتر از بی‌کربنات است، بنابراین سختی در این نمونه‌ها از هر دو نوع سختی موقت و دائمی می‌باشد. مقدار سختی نمونه‌های برف نیز بین ۲۰ تا ۲۵ بوده که در محدوده آب‌های نرم قرار می‌گیرند.

$$TH \text{ (mg/l as CaCO}_3\text{)} = (2.5Ca^{2+} + 4.2Mg^{2+}) \text{ ppm}$$

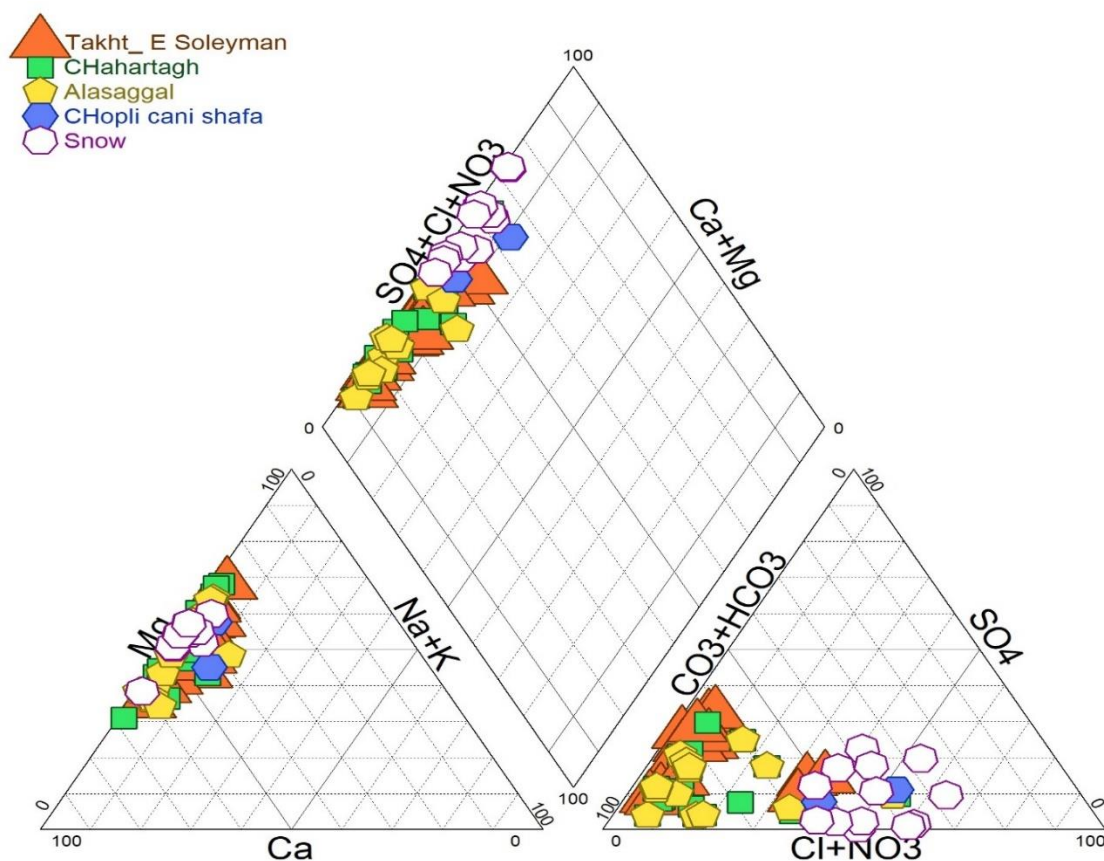
جدول ۴-۲ طبقه‌بندی کیفی آب‌ها بر اساس سختی کل (Todd, 2005)

کیفیت آب	سختی کل (mg/l as CaCO ₃)	نمونه آب مورد مطالعه
آب نرم	کمتر از ۷۵	Snow samples
نسبتاً سخت	بین ۷۵ تا ۱۵۰	-
سخت	بین ۱۵۰ تا ۳۰۰	Sp1,2,3,4
خیلی سخت	بیشتر از ۳۰۰	-

۴-۶- نمودار پایپر (piper)

یکی از کاربردی‌ترین نمودارهایی که جهت بررسی تیپ آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، دیاگرام مثلثی پایپر است. شباهت‌ها و تفاوت‌های نمونه‌ها از طریق نمودار پایپر به خوبی مشخص می‌شود زیرا نمونه‌هایی که دارای خصوصیات مشابه هستند به صورت گروهی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. نمودار پایپر عمدتاً جهت تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی و مسیرهای تکامل ژئوشیمیایی در آبخوان‌ها تهیه می‌گردند. هم‌چنین از نمودار پایپر جهت تعیین تیپ آب، انحلال یا رسوب‌گذاری، اختلاط و تبادل یونی استفاده می‌شود. رخساره‌های هیدروشیمیایی جهت نمایش اختلاف در ترکیب شیمیایی آب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Freeze & cherry, 1997). در نمودار پایپر آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی در دو مثلث مجاور هم قرار می‌گیرند و ترکیب شیمیایی هر نوع آب براساس درصد کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر روی آن، به صورت یک نقطه رسم می‌گردد. با توجه به محل قرارگیری نمونه‌های آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه در دیاگرام پایپر، تقریباً همه نمونه‌ها غنی از کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات می‌باشد و دارای سختی موقت تا دائمی هستند. نمونه‌های چشمه‌ها در مثلث آنیون‌ها دارای مقادیر مشابهی بوده اما نسبت به غلظت کاتیون‌ها پراکندگی کمی نشان می‌دهند که نشان‌گر تفاوت در

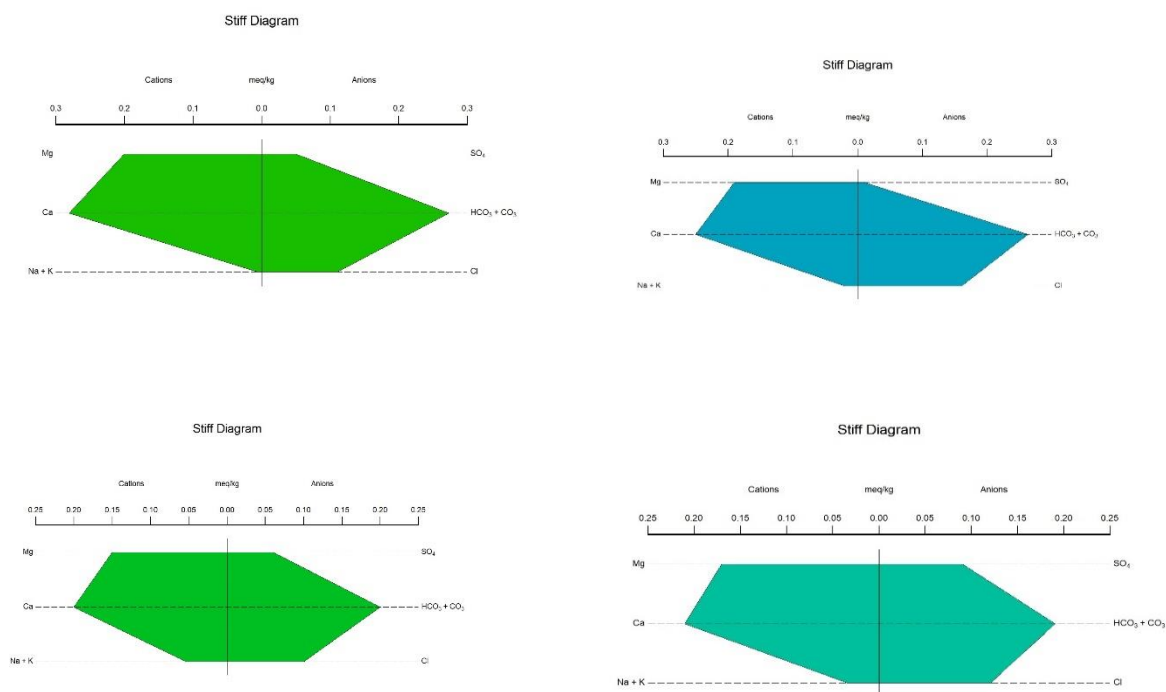
جنس سازند و یا رخداد پدیده تبادل یونی در طول مسیر جریان باشد شکل (۳-۴). با توجه به نمودار تیپ غالب آب کلسیک، منیزیک بی کربناته است که با توجه به کربناته بودن سنگ مخزن این چشمه‌ها قابل انتظار می باشد. نمونه‌های برف منطقه بر روی دیاگرام پایپر نیز پلات شده است. مقدار غلظت کلسیم و منیزیم نمونه‌های برف تقریباً در محدوده چشمه‌ها قرار گرفته، اما در غلظت آنیون‌ها متفاوت می‌باشد. بطوری که مقدار غلظت کلر در نمونه‌های برف بیشتر بوده و باعث شده تا تیپ آب در نمونه‌های برف کمی کلروره شده و بصورت $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca-Mg}$ شود. البته مقدار EC نمونه‌های برف کم می‌باشد و تغییر تیپ کمی کلروره در آنها می‌تواند به دلیل آلودگی هوا و یا منشا دریایی آنها باشد. با توجه به غلظت کم یون‌ها، مقدار کم انحلال عناصر نمکی در آنها می‌تواند تیپ آب را تغییر دهد.

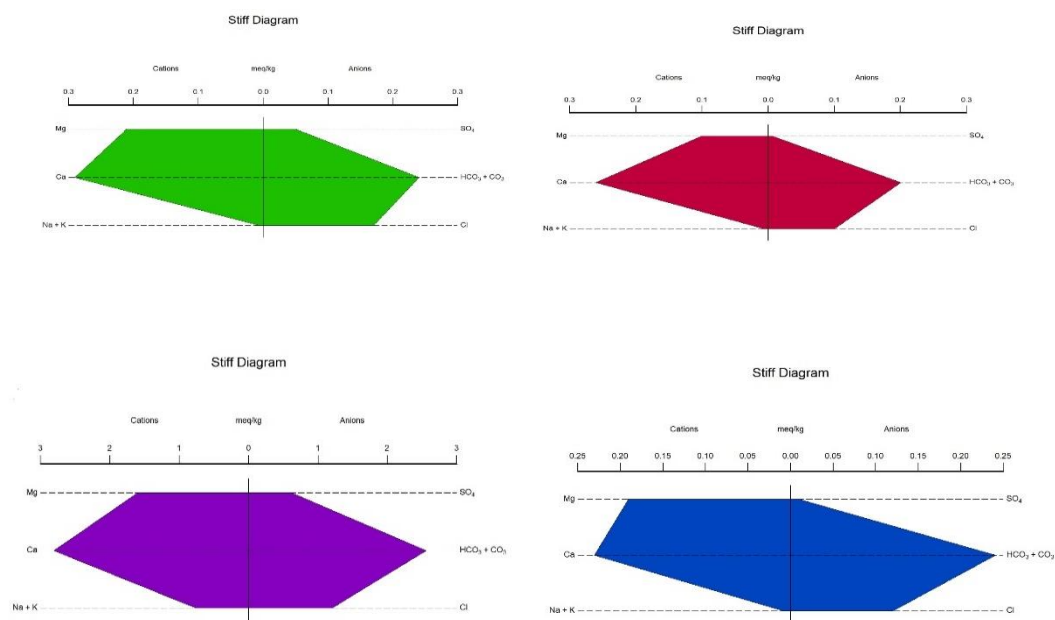


شکل (۳-۴) نمودار پایپر چشمه‌های مورد مطالعه منطقه

۴-۷- نمودار استیف (Stiff)

استفاده از نمودار استیف، یکی از بهترین روش‌ها جهت تعیین تیپ آب است. اندازه و شکل حاصل از این نمودار، تقریباً متناسب با کل محتوای یونی است. در این نمودار، هر نمونه آب به صورت جداگانه بررسی می‌شود. غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها در نمودار مذکور برحسب meq/l بر روی خط افقی واقع می‌گردند. هر چه مساحت شکل به دست آمده بیش‌تر باشد، غلظت املاح موجود در آب نیز بیش‌تر خواهد بود (Hounslow, 1995). این نمودار همچنین جهت تشخیص سنگ منشأهای مختلف، بیان تفاوت‌های موجود در رخساره‌های هیدروشیمیایی و غلظت کل جامدات محلول در آب نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۴-۴) نمودار استیف مربوط به برخی چشمه‌ها مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به اشکال مشاهده می‌شود که تیپ و رخساره‌ی غالب در تمامی نمونه‌ها کلسیک، منیزیک کربناته است.



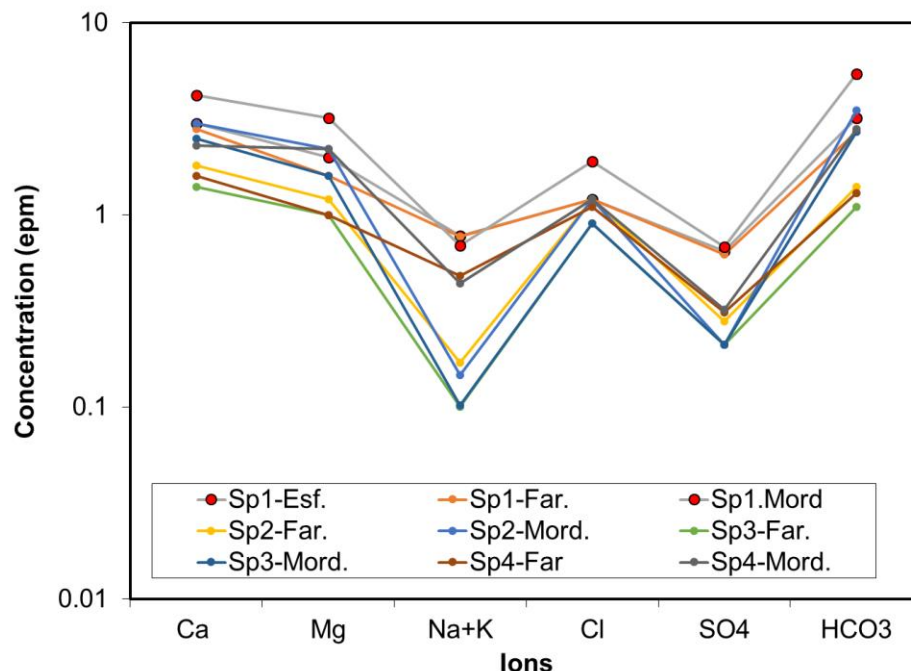


شکل ۴-۴: نمودار استیف مربوط به چشمه‌های مورد مطالعه

۴-۱- نمودار شولر (Schoeller)

نمودار شولر یک نمودار نیمه لگاریتمی جهت مقایسه‌ی تعداد زیاد نمونه‌های آب، یکسان بودن یا نبودن منشأ نمونه‌ها و بررسی روند تغییرات غلظت متفاوت یون‌ها می‌باشد. در محور افقی این نمودار یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، کالر، بی‌کربنات و سولفات برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر واقع می‌گردد. نمودار شولر به منظور بررسی یکسان بودن یا نبودن منشأ نمونه‌ها، بررسی روند مقادیر یون‌های اصلی آب و مقایسه بین نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Todd and Mays 2005). با توجه به شکل (۴-۵) تمام نمونه‌ها دارای روند یکسانی می‌باشند که نشان دهنده‌ی منشأ یکسان آب آن‌ها می‌باشد. همه نمونه‌ها نسبت به کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات غالب می‌باشند و تیپ آب به صورت Ca-Mg-HCO_3 می‌باشد که ناشی از تغذیه از طریق مناطق آهکی است. مقدار یون منیزیم در چشمه‌ها زیاد می‌باشد که با توجه به وجود سازند آهکی - دولومیتی قابل انتظار است.

سازندهای کربناته در این منطقه در بیشتر مکان‌ها دولومیتی است. با گذشت زمان و تماس آب با سازندهای مختلف امکان تغییر ترکیب شیمیایی اولیه آب وجود دارد.

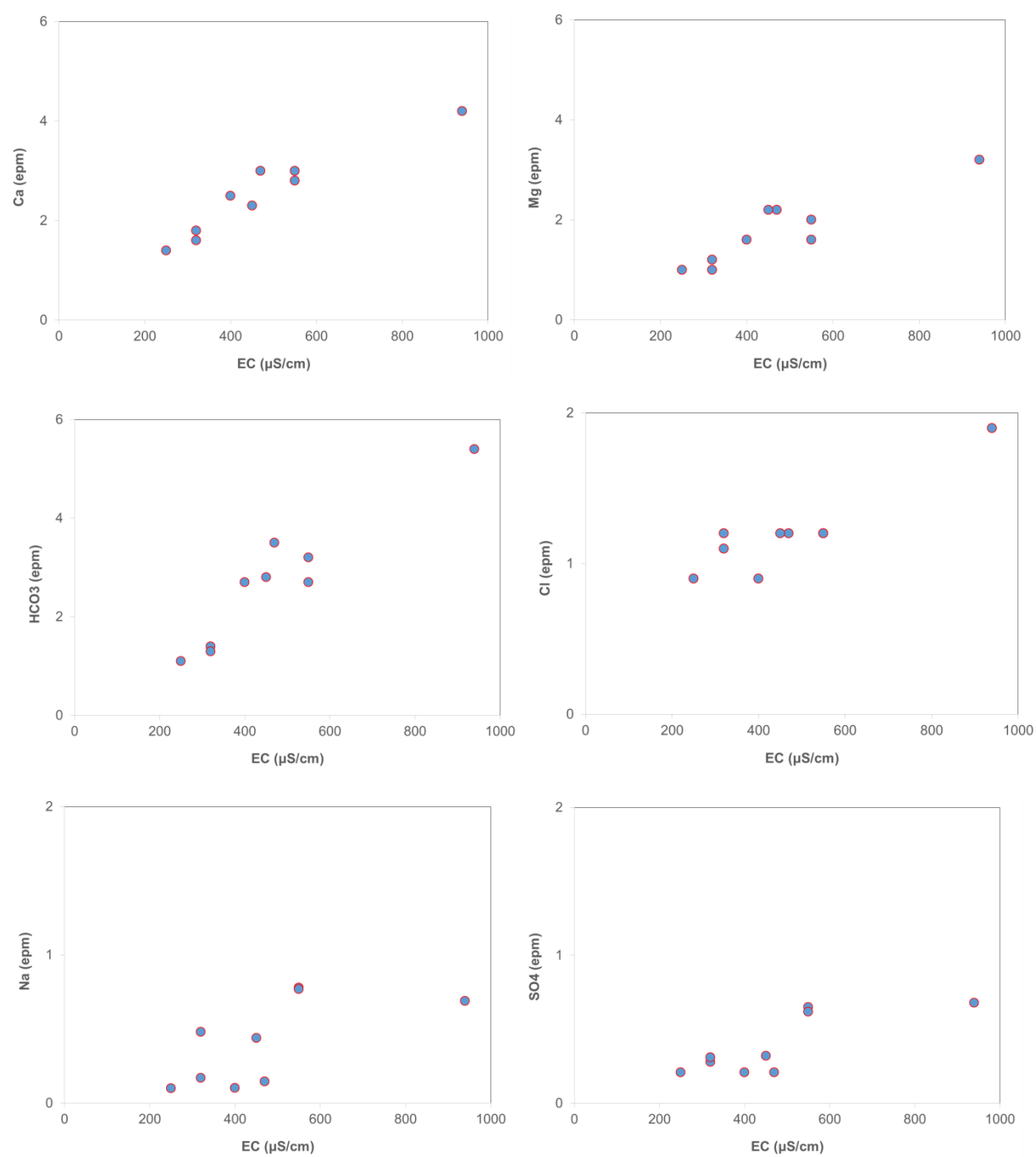


شکل ۴-۵: نمودار شولر چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

۴-۹- ارتباط هدایت الکتریکی با سایر یون‌ها

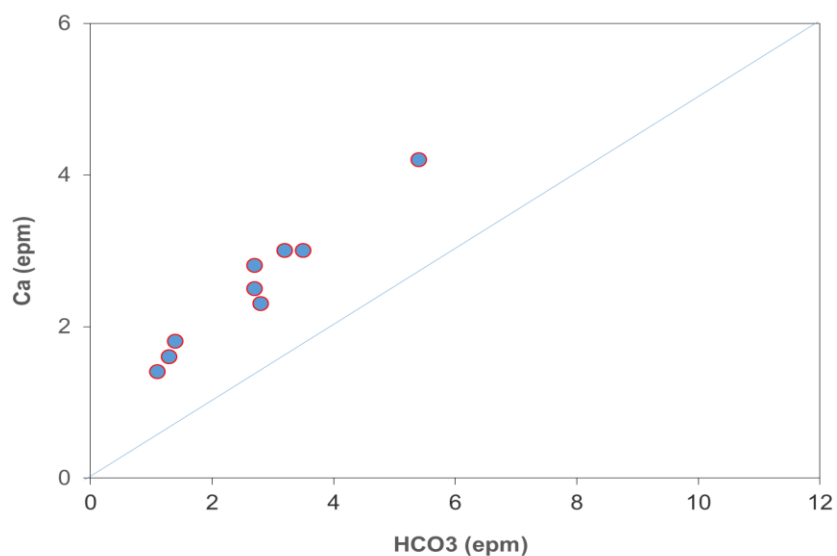
جهت ارزیابی ارتباط هدایت الکتریکی با سایر یون‌ها نمودار تغییرات کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی در مقابل هدایت الکتریکی ترسیم شده است (شکل ۴-۶). براساس این نمودارها مشاهده می‌شود که روند هدایت الکتریکی با یون‌های موجود تطابق و رابطه‌ی مستقیمی ندارد و به عبارتی پراکندگی داده‌ها بسیار زیاد بوده و هر چشمه‌ای الگوی متفاوتی داشته است و تفاوت منشأ هیدروشیمیایی چشمه‌ها را نشان می‌دهد. اما در کل مقدار EC با یون‌های کلسیم و منیزیم و بی‌کربنات رابطه‌ی مستقیمی را نشان می‌دهد. این مسأله بیان‌گر این است که عامل افزایش و تغییر EC در منطقه می‌تواند انحلال کربنات‌ها باشد. در سایر یون‌ها رابطه‌ی مشخصی مشاهده

نمی‌گردد که این عدم ارتباط همه‌ی یون‌ها با مقدار EC می‌تواند نشان‌گر عدم رخداد تبخیر در منطقه و حوضه آگیر آن‌ها در طول مسیر جریان باشد.

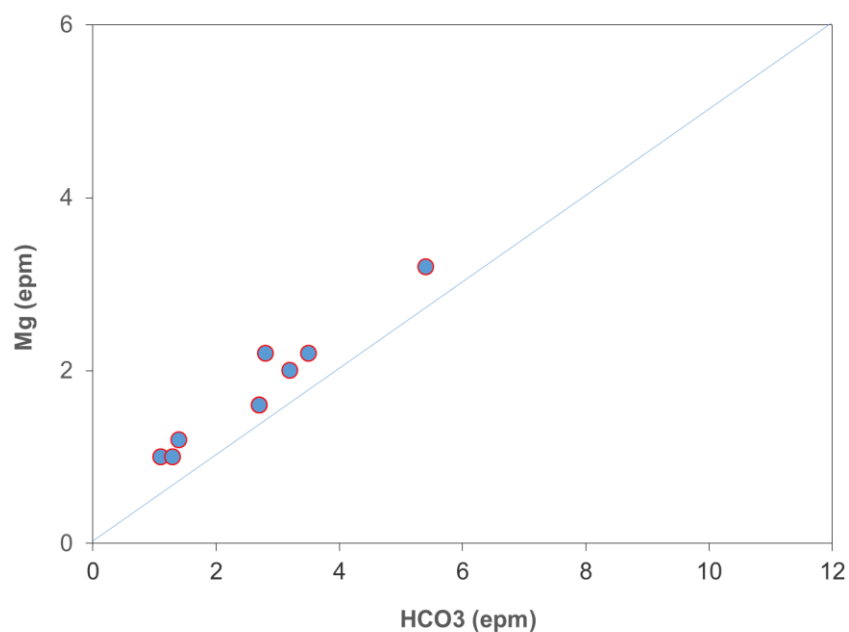


شکل ۴-۶- ارتباط هدایت الکتریکی با یون‌های موجود در چشمه‌های مورد مطالعه

شکل‌های ۷-۴ و ۸-۴ رابطه بین کلسیم و منیزیم با بی‌کربنات را نشان می‌دهد. در اثر انحلال کربنات‌ها، مقدار غلظت کلسیم و منیزیم و بی‌کربنات در آب زیاد می‌شود. با توجه به رابطه مستقیم بین این یون‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که فرایند غالب کنترل کننده شیمی آب چشمه‌های کارستی منطقه، انحلال کربنات‌ها می‌باشد.



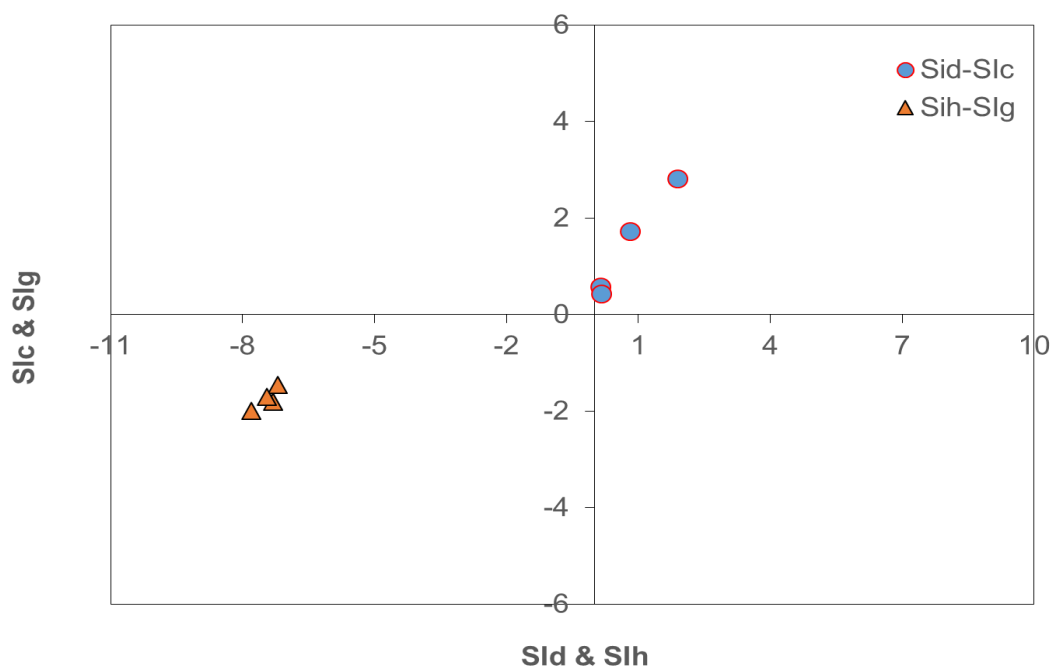
شکل ۷-۴: رابطه بین کلسیم با بی‌کربنات در نمونه‌های آب چشمه‌ها



شکل ۸-۴: رابطه بین منیزیم با بی‌کربنات در نمونه‌های آب چشمه‌ها

۴-۱۰- شاخص اشباع

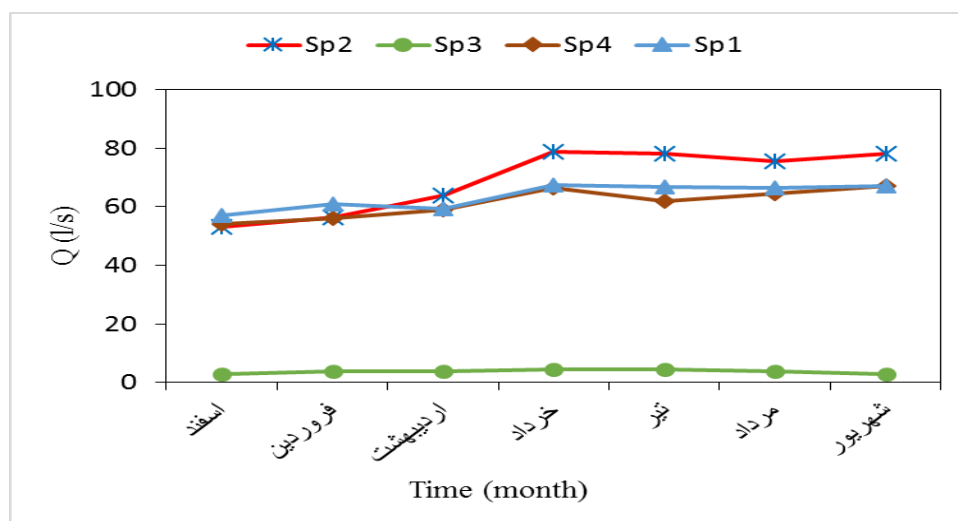
جهت محاسبه‌ی شاخص اشباع چهار کانی مهم کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت در منطقه‌ی مورد مطالعه از نرم افزار PHREEQC استفاده شد. به طور کلی اگر شاخص اشباع نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به یک کانی منفی باشد، بیان‌گر تحت اشباع بودن آب زیرزمینی نسبت به آن کانی است و آب زیرزمینی می‌تواند همچنان این کانی را در خود حل کند. اما در صورتی که شاخص اشباع نسبت به یک کانی مثبت باشد نشان‌گر فوق اشباع بودن منبع نسبت به آن کانی است. شکل ۴-۹ شاخص اشباع مربوط به کانی‌های کلسیت، دولومیت، هالیت و ژیپس را در منطقه نشان می‌دهد. بر این اساس تمامی نمونه‌های چشمه‌های منطقه نسبت به کانی‌های ژیپس، هالیت تحت اشباع و نسبت به کانی‌های کلسیت و دولومیت اشباع تا فوق اشباع می‌باشند.



شکل ۴-۹: شاخص‌های اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

۴-۱۱- خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی منطقه

در منطقه تخت سلیمان چشمه‌های کارستی مختلفی وجود دارد. در این مطالعه از چهار چشمه نمونه گرفته شده است. چشمه اصلی تخت سلیمان با دبی متوسط ۶۵ لیتر بر ثانیه از داخل عمارت تخت سلیمان تخلیه می‌گردد. چشمه‌ها در نزدیکی چشمه اصلی قرار ندارند و با فاصله زیاد از آن تخلیه می‌گردند و در این مطالعه بحث اصلی مطالعه هیدروژئولوژی چشمه اصلی تخت سلیمان می‌باشد و از سایر چشمه‌ها فقط جهت مقایسه استفاده شده است. مقادیر دبی چشمه بین ۳ تا ۸۰ لیتر بر ثانیه متغیر می‌باشد (شکل ۴-۱۰).



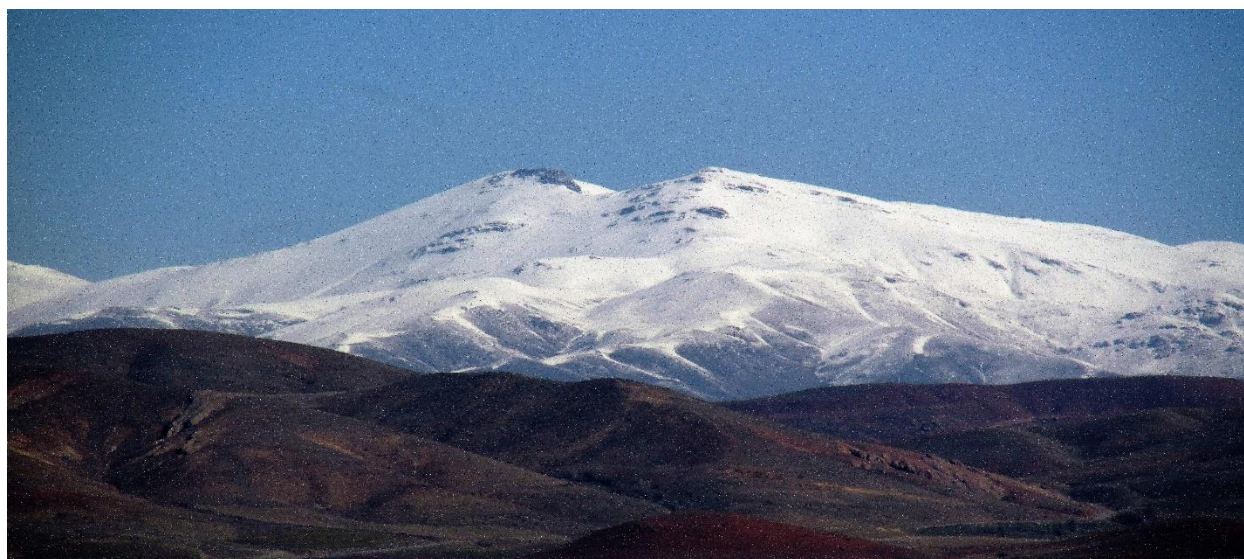
شکل ۴-۱۰: خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

۴-۱۱-۱ چشمه کارستی تخت سلیمان (Sp1)

چشمه کارستی اصلی موجود در منطقه تخت سلیمان، از درز و شکاف موجود در ماسه‌سنگ قم در وسط عمارت تخت سلیمان تخلیه می‌گردد. شکل (۴-۱۲) بخشی از این چشمه را نشان می‌دهد.

۴-۱۱-۱- بررسی تغییرات زمانی دبی در چشمه تخت سلیمان

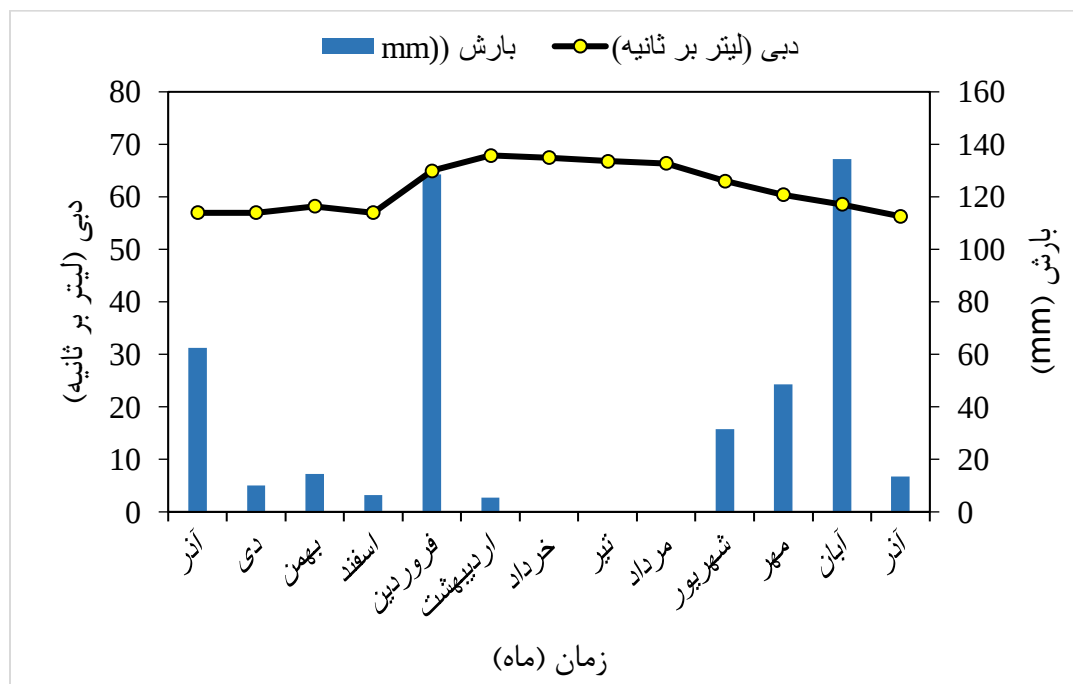
هیدروگراف چشمه نتیجه نهایی تحولات بارش و انتقال دیگر جریانات ورودی از مناطق زهکشی به صورت یک خروجی واحد از چشمه می‌باشد. این نوع تغییرات همواره به عنوان مهم‌ترین معیار برای بررسی نوع جریان در آبخوان کارستی، تعیین حوضه آبرگیر چشمه، ارزیابی توسعه‌ی کارست و نرخ نفوذ و تغذیه در آبخوان کارستی می‌باشد. به طور کلی در آبخوان‌های کارستی، اگر تغییرات آب‌دهی زیاد باشد و این تغییرات در مدت زمان کوتاهی انجام گیرد می‌توان از آن نتیجه گرفت که کارست توسعه‌یافته در منطقه وجود دارد و اگر تغییرات آب‌دهی کم و به صورت تدریجی باشد، در منطقه کارست توسعه‌یافتگی کم‌تری دارد (کاظمی ۱۳۹۴). برای بررسی تغییرات زمانی دبی چشمه‌های منطقه، هیدروگراف آن‌ها در ماه‌های مختلف ترسیم شده است (شکل ۴-۱۳). با توجه به هیدروگراف مشاهده می‌شود که دبی اوج با مقدار ۶۷,۵ لیتر بر ثانیه در خرداد ماه می‌باشد. هم‌چنین کم‌ترین دبی با مقدار ۵۷ لیتر بر ثانیه در طی آبان ماه است. با مقایسه‌ی ضریب تغییرات این چشمه با چشمه‌های دیگر و هم‌چنین نتایج مطالعات جیکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir, 1974)، سیستم غالب جریان در این چشمه غالباً از نوع افشان تا کمی مجرای است.



شکل ۴-۱۱: نمایی از کوه بلقیس



شکل ۴-۱۲: نمایی از چشمه کارستی تخت سلیمان



شکل ۴-۱۳: هیدروگراف چشمه تخت سلیمان در سال آبی ۹۴-۹۵

۴-۱۱-۲ تحلیل منحنی فرود و محاسبه‌ی ضرایب فرود چشمه تخت سلیمان

به منظور بررسی کمی تخلیه آب و همچنین برآورد ضرایب فرود چشمه‌ها، منحنی فرود (Recession Curve) آن با استفاده از داده‌های مربوط به هیدروگراف چشمه تهیه شده است (شکل ۴-۱۳). این منحنی به صورت نیمه لگاریتمی بوده به این صورت که دبی در روی محور عمودی که لگاریتمی است در برابر زمان ترسیم می‌شود که روند داده‌ها به صورت یک خط مستقیم یا خط‌های با شیب متفاوت نمایان می‌شود. شیب خط و یا خطوط شکسته شده به عنوان ضرایب فرود در نظر گرفته می‌شود. به منظور محاسبه‌ی ضریب فرود چشمه، از معادله (۴-۲) که براساس مطالعات مایلت و بوسینگ (Maillet 1905, Boussinesq 1903 & 1904) ایجاد گردیده، استفاده شده است. این محققین با فرض اینکه تخلیه‌ی چشمه، تابعی از حجم آب ذخیره شده در مخزن است (جریان ورودی عملاً نیست یا صفر است) آن را به شکل معادله‌ی نمایی نشان دادند (Ford and Williams 2007).

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha t} \quad \text{معادله (۴-۲)}$$

در این معادله، Q_t آبدهی چشمه در زمان t ، Q_0 آبدهی در زمان صفر، t زمان بین Q_0 و Q_t ، پایه لگاریتم طبیعی (نپرین) و α ضریب دبی می‌باشد. شکل لگاریتمی معادله (۴-۲) به صورت ذیل می‌باشد:

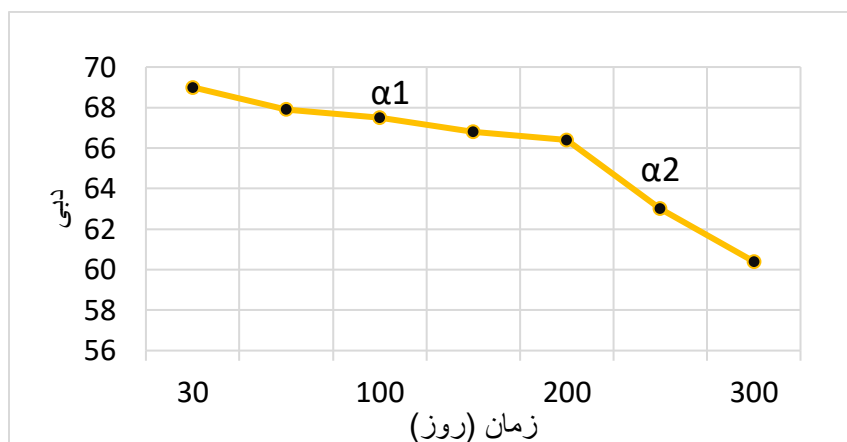
$$\alpha = \frac{\log Q_0 / Q_t}{0.4343(t)} \quad \text{معادله (۴-۳)}$$

که در این معادله ضریب دبی میزان توانایی سفره آب زیرزمینی در ذخیره‌سازی آب را نشان می‌دهد و تابع تخلخل مؤثر، قابلیت انتقال، شکل حوضه آگیر، وضعیت سطح پتانسیومتری و تغذیه از آبخوان‌های دیگر می‌باشد. براساس نظر (Milanovic 1981)، هنگامی که منحنی فرود دارای شیب کم باشد، این حالت می‌تواند بر ذخیره دینامیکی بالای آبخوان دلالت نماید که چشمه‌های این نوع آبخوان‌ها اکثراً دائمی هستند. برعکس وقتی که ضریب α زیاد باشد منحنی فرود دارای شیب تند بوده و ذخایر دینامیکی در این موقع موقتی بوده و خیلی

سریع تخلیه می‌شود. به طور کلی هنگامی که ضریب فروکش در مرتبه‌ی 10^{-2} قرار داشته باشد نشان دهنده‌ی زهکشی سریع شکستگی‌ها و مجاری کارستی است و هنگامی که این ضریب کوچک‌تر باشد مرتبه 10^{-3} نشان دهنده‌ی تخلیه حفرات و درزه و شکستگی‌های ریز می‌باشد. همچنین بهتر است برای تحلیل ضرایب فروکش، شرایط فیزیوگرافی حوضه آبرگیر (شکل و شیب حوضه آبرگیر) و تراوایی لایه‌های مختلف آبخوان نیز بررسی شود، جدول ۳-۴: مشخصات پارامترهای هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی تخت سلیمان

پارامترهای هیدرودینامیکی		دبی (l/s)	تاریخ (ماه)
۰,۰۰۱۵	ضریب فرود ($\alpha 1$)	۵۷	آذر
۰,۰۰۲	ضریب فرود ($\alpha 2$)	۵۷	دی
		۵۸,۲	بهمن
۶۱,۹۳	میانگین دبی	۵۷	اسفند
۲۲,۵۶	انحراف معیار	۶۵	فروردین
۴,۷۴	ضریب تغییرات	۶۷,۹	اردیبهشت
۷,۵۴	pH	۶۷,۵	خرداد
۹۴۰	هدایت الکتریکی ($\mu\text{s/cm}$)	۶۶,۸	تیر
۴,۷۴	ضریب تغییرات	۶۶,۴	مرداد
$Q=69e^{-0.0015t} + 67.5e^{-0.002}$	مشخصه رابطه منحنی فرود	۶۳	شهریور
		۶۰,۴	مهر
		۵۸,۶	آبان
		۵۶,۳	آذر

چرا که زمان انتقال آب در حوضه‌های کشیده‌ی لایه‌های کم تراوا و تغذیه از آبخوان‌های مجاور می‌تواند ضرایب فروکشی با مرتبه‌ی کوچک‌تر و در حوضه‌های گرد و یا تراوایی بالا عکس این حالت را ایجاد نماید. با توجه به شکل (۴-۱۴) مشاهده می‌گردد که منحنی فرود برای چشمه کارستی تخت سلیمان دارای دو رژیم خطی با مقادیر کم ضریب α است. منحنی فرود برای چشمه اصلی کارستی تخت سلیمان حاوی دو شیب بوده و مقدار ضریب دبی برای α^1 برابر $0,0015$ و برای α^2 برابر با $0,00197$ می‌باشد.

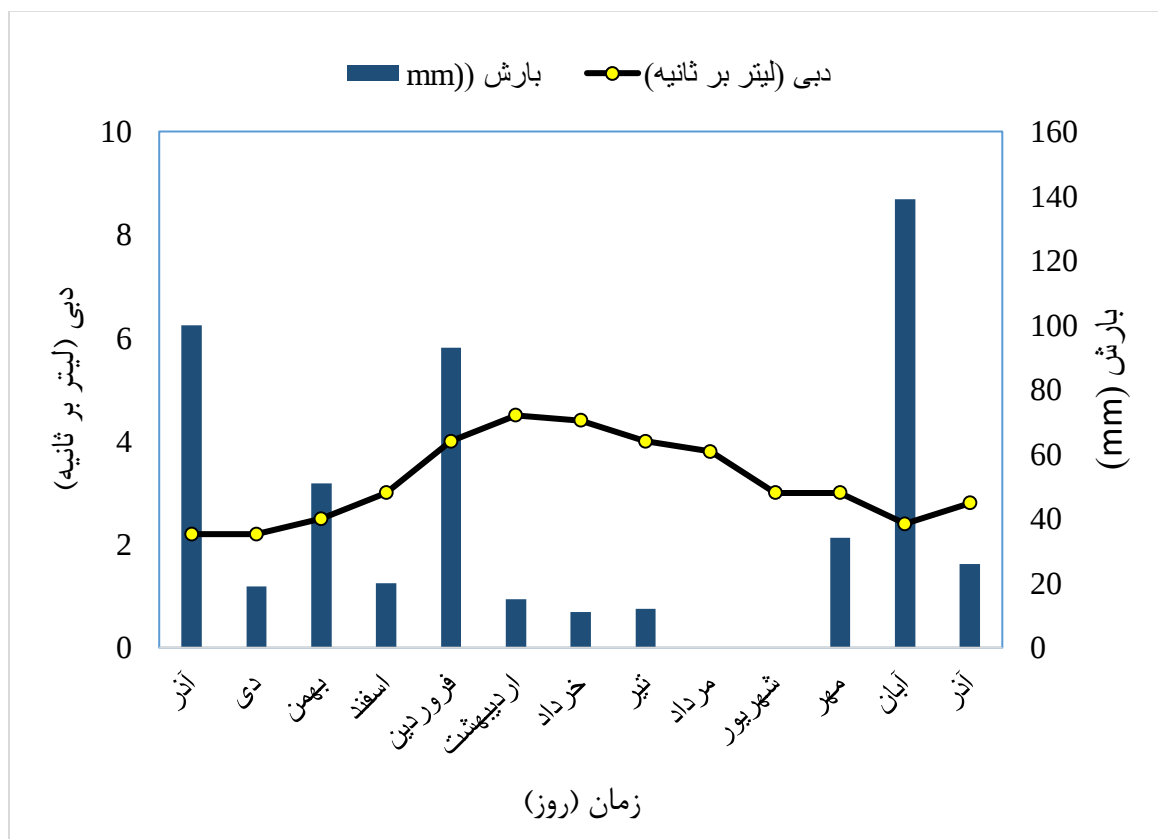


شکل (۴-۱۴) منحنی فرود چشمه کارستی تخت سلیمان

براساس روش مایلت ووجتکوا (۲۰۱۲)، درجه توسعه کارست این چشمه ۲,۳ درصد برآورد گردید. در این نوع از آبخوان‌ها درز و شکاف‌های کوچک غلبه دارند. با توجه به ضرایب α این چشمه کارستی در ابتدا کم (ضریب α^1) و افزایش یافته (ضریب α^2)، می‌توان چنین استنباط کرد که کم بودن ضریب α^1 به علت کم بودن توسعه کارست در قسمت بالایی آبخوان و همچنین به علت پوشش گیاهی و یک لایه از مواد ریزدانه و تغذیه ثابت از یک منبع (مانند برف) برای یک دوره که نرخ نفوذ به آبخوان را کاهش داده است. بالا بودن ضریب α^2 را به زهکشی از درز و شکاف‌های بزرگ‌تر می‌توان نسبت داد. با توجه به داده‌ها سیستم غالب جریان در این منطقه احتمالاً افشان می‌باشد.

۴-۱۱-۲-۱- تغییرات دبی چشمه کارستی آلاسقل

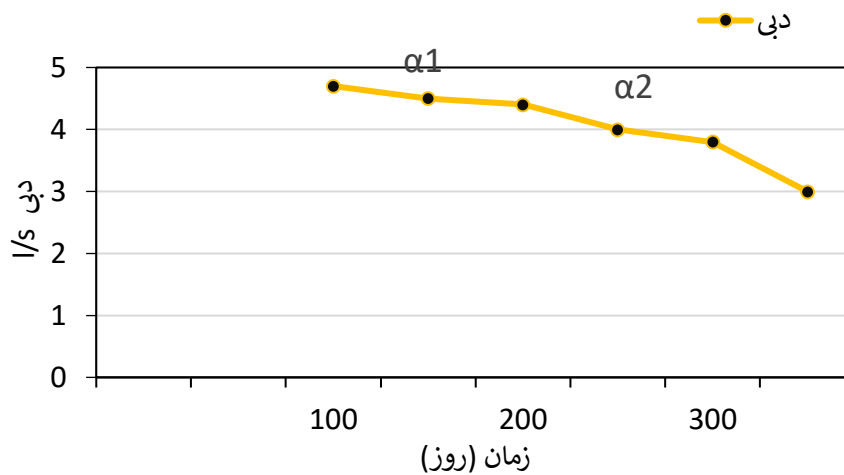
منحنی فرود چشمه‌ها متأثر از وجود شرایط خاص در رژیم تخلیه‌ی چشمه‌ها هم‌چون رژیم بارش، لیتولوژی، طرز قرارگیری لایه‌ها و ضخامت آن‌ها، بافت و تخلخل سنگ‌ها نتیجه می‌شود. منحنی فرود در نواحی کمتر توسعه یافته کارستی، به طور معمول روند خطی یکنواخت را نشان می‌دهد، اما رفتار هیدروگراف چشمه‌ها در نواحی با کارست توسعه یافته، سه ضریب فرود متفاوت را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۴-۱۵) مشاهده می‌شود دبی چشمه از اسفند رو به افزایش بوده و در فروردین ماه به اوج خود می‌رسد و در اواخر خرداد ماه کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به تغییرات کم آبدهی نشان دهنده این است که تغذیه این چشمه به صورت افشان است.



شکل (۴-۱۵) هیدروگراف چشمه آلاسقل در سال آبی ۹۴-۹۵

۴-۱۱-۲-۲- تحلیل منحنی فرود چشمه آلاسقل

شکل (۴-۱۶) منحنی فرود چشمه آلاسقل را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی فرود دارای سه رژیم خطی با مقادیر زیاد α ، درجه توسعه کارست ۲,۳ درصد است که نشان دهنده توسعه کم کارست در منطقه را می‌باشد.



شکل (۴-۱۶) منحنی فروکش چشمه کارستی آلاسقل

جدول (۴-۴) مشخصات پارامترهای هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی آلاسقل

پارامترهای هیدرودینامیکی		دبی (l/s)	تاریخ (روز)
۰,۰۰۱۱	ضریب فرود $\alpha 1$	۲,۲	آذر
۰,۰۰۱۶	ضریب فرود $\alpha 2$	۲,۲	دی
۰,۰۰۲	ضریب فرود $\alpha 3$	۲,۵	بهمن
	درجه کارستی شدن	۲,۹	اسفند
	دبی پایه (%)	۴,۱	فروردین
	جریان سریع (%)	۴,۵	اردیبهشت
۳,۲۲	میانگین دبی	۴,۴	خرداد
	انحراف معیار	۴	تیر
	ضریب تغییرات	۳,۸	مرداد

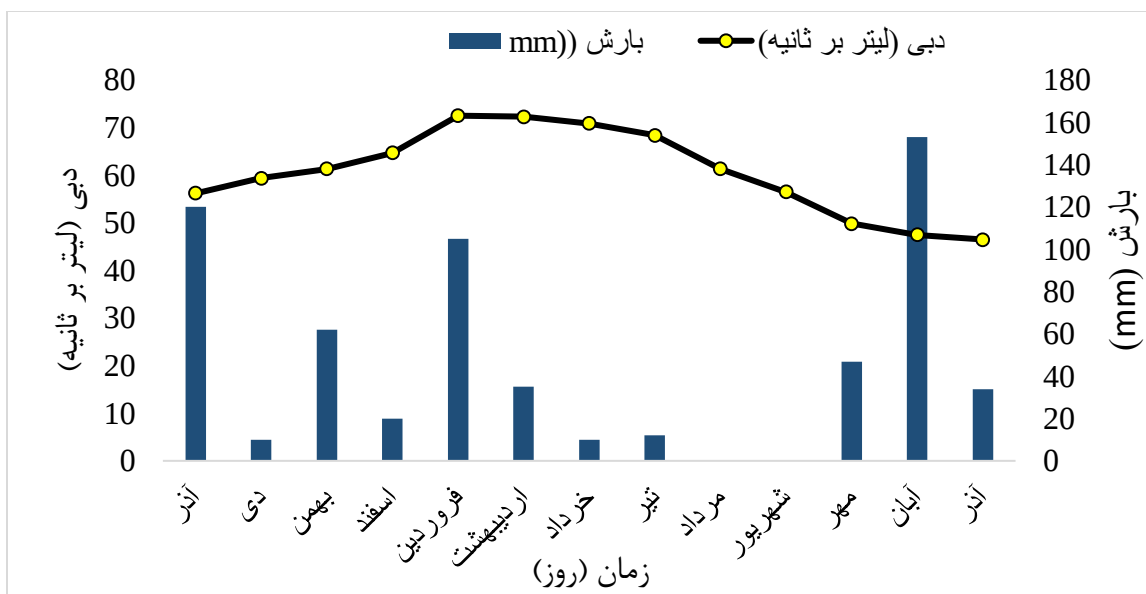
۷,۶۵	pH	۳	شهریور
۴۷۰	هدایت الکتریکی (μs/cm)	۳	مهر
		۲,۴	آبان
$Q=4.7e^{-0.0011t} + 4.4e^{-0.0016t} + 3e^{-0.002}$	مشخصه رابطه منحنی فرود	۲,۸	آذر

۴-۱۱-۳-۱- تغییرات دبی چشمه کارستی چوپلی کانی شفا

برای ارزیابی تغییرات زمانی دبی چشمه‌های کارستی، هیدروگراف آن‌ها در ماه‌های مختلف ترسیم شده است (شکل ۴-۱۸). با توجه به هیدروگراف ملاحظه می‌شود که تغییرات زیادتری در میزان آبدهی آن وجود ندارد، هم‌چنین تغییرات آبدهی آن نسبت به بارندگی با تأخیر کم‌تری صورت گرفته که می‌تواند دلیلی بر توسعه بیش‌تر کارست منطقه می‌باشد. با توجه به بازدیدهای صحرایی انجام شده، عوارض کارستی هم‌چون کارن و فضاهای خالی در منطقه مشاهده گردیده است (مهدوی پور، ۱۳۹۳). با این وجود سیستم غالب جریان می‌تواند افشان باشد.



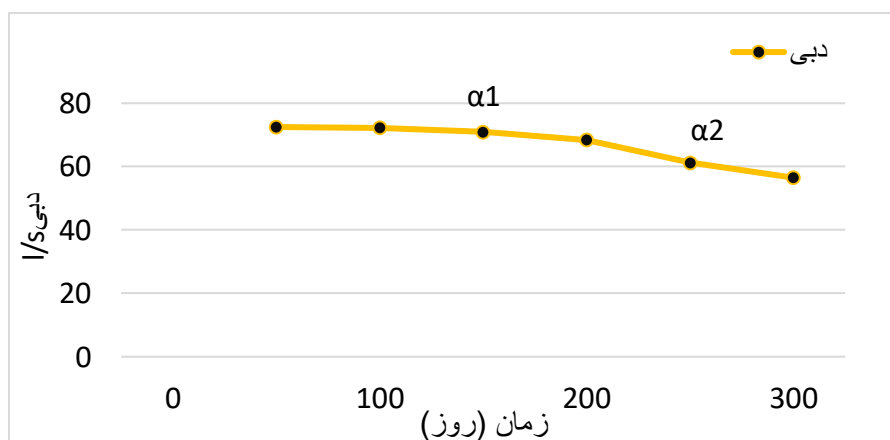
شکل ۴-۱۷: نمایی از چشمه کارستی چوپلی کانی شفا



شکل (۴-۱۸) هیدروگراف چشمه چوپلی کانی شفا

۴-۱۱-۳-۲- تحلیل منحنی فرود چشمه چوپلی کانی شفا

همان‌طور که در شکل (۴-۱۹) مشاهده می‌شود منحنی فرود چشمه چوپلی کانی شفا دارای دو شیب با مقادیر کم ضریب α می‌باشد. درجه توسعه یافتگی کارست این چشمه ۲,۷ درصد برآورد گردید. در این نوع از آبخوان‌ها درز و شکاف‌های کوچک غلبه دارند.



شکل (۴-۱۹) منحنی فروکش چشمه کارستی چوپلی کانی شفا

جدول (۴-۵) مشخصات پارامترهای هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی چوپلی کانی شفا

تاریخ (روز)	دبی (l/s)	پارامترهای هیدرودینامیکی
آذر	۵۶,۲	ضریب فرود α_1
دی	۵۹,۴	ضریب فرود α_2
بهمن	۶۱,۳	
اسفند	۶۴,۷	درجه کارستی شدن
فروردین	۷۲,۵	دبی پایه (%)
اردیبهشت	۷۲,۳	جریان سریع (%)
خرداد	۷۰,۹	میانگین دبی
تیر	۶۸,۴	انحراف معیار
مرداد	۶۱,۳	ضریب تغییرات
شهریور	۵۶,۵	pH
مهر	۴۹,۸	هدایت الکتریکی ($\mu\text{S/cm}$)
آبان	۴۷,۵	
آذر	۴۶,۵	مشخصه رابطه منحنی فرود
$Q = 72.5e^{-0.0015t} + 70.9e^{-0.002}$		

بطور کلی با توجه به بررسی انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که سیستم غالب جریان در منطقه مورد مطالعه غالباً بصورت افشان و در برخی نقاط تاحدودی مجرای می‌باشد.

۴-۱۲- خصوصیات ایزوتوپی چشمه‌های منطقه جهت تعیین منشأ و ارتفاع تغذیه

مقدار ایزوتوپ‌های پایدار در منابع آبی مختلف به منشأ تغذیه آن‌ها وابسته است. با بررسی ایزوتوپ‌های پایدار منطقه می‌توان به منشأ و میزان برهم کنش آن‌ها دست یافت (Clark and Fritz, 1997). نتایج حاصل از آنالیز

ایزوتوپی نمونه‌های بارش و چشمه‌های کارستی منطقه در جدول (۴-۶) ارائه شده است. در ادامه در ابتدا به بررسی ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های بارش و سپس به نمونه‌های چشمه‌ها پرداخته می‌شود.

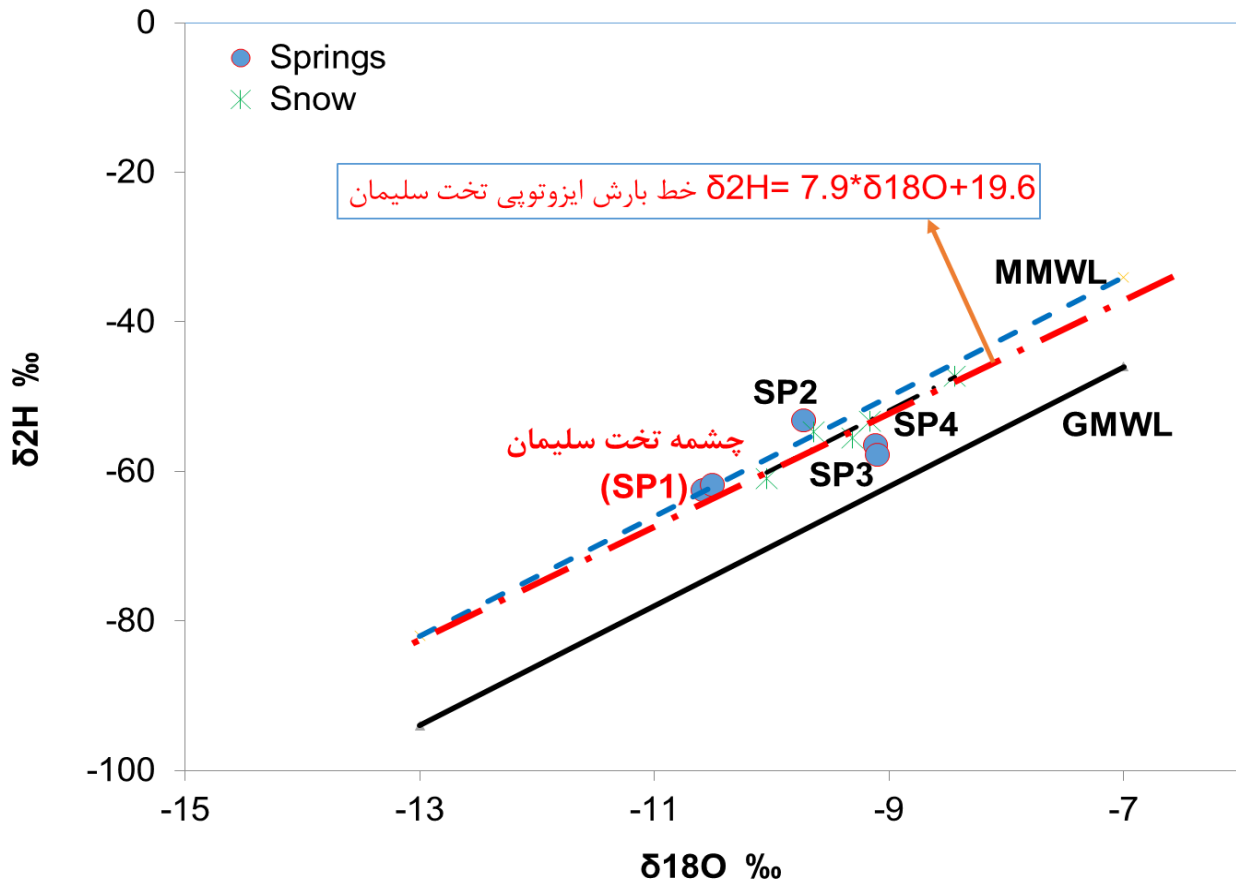
۴-۱۲-۱- ترکیب ایزوتوپی بارش

داده‌های 18O و 2H برای ۵ نمونه بارش مربوط به ارتفاعات مختلف به همراه خط بارش جهانی GMWL (Craig, 1961) و خط بارش مدیترانه MMWL در شکل ۴-۲۰ ترسیم شده است. رابطه تقریباً خطی بین دوتریم و اکسیژن ۱۸ در آب‌های جوی، یکی از مهم‌ترین روابط مشاهده شده در ژئوشیمی آب‌ها می‌باشد. کرایک در سال ۱۹۶۱ (Craig, 1961) برای اولین بار ارتباط بین دوتریم و اکسیژن ۱۸ در آب‌های شیرین در مقیاس جهانی منتشر کرد، که به عنوان خط بارش جهانی (GMWL) شناخته می‌شود که در شرایط تعادلی و در دمای ۲۵ درجه، معادله آن بصورت رابطه زیر می‌باشد:

معادله ۴-۴:

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$$

خط بارش جهانی با توجه به داده‌های ایزوتوپی بارندگی در سراسر جهان و از میانگین تعدادی زیادی خط بارش محلی (LMWL) که هر کدام دارای شیب و عرض از مبدا متفاوت می‌باشند حاصل شده است. شیب ۸ نشان می‌دهد که در نمونه‌های بارش، مقدار دوتریم بیشتر از اکسیژن غنی می‌شود و مربوط به شرایط تشکیل بارش است و عرض از مبدا تابع شرایط آب و هوایی زمان تشکیل ابر است. هر دو پارامتر شیب و عرض از مبدا تحت تاثیر تبخیر ثانویه در هنگام ریزش جوی قرار می‌گیرند.



شکل ۴-۲: مقادیر ایزوتوپی بارش به همراه نمونه‌های چشمه‌های منطقه و خط بارش جهانی (GMWL) و مدیترانه‌ای (MMWL) بطور کلی، ترکیب ایزوتوپی بارش در مناطق مختلف به GMWL می‌تواند نزدیک باشد و بارش‌های زمستانه تهی‌تر از بارش‌های تابستانه است. بارش‌های ایران بیشتر تحت تاثیر جبهه‌های هوا نشات گرفته از مدیترانه می‌باشد. خط بارش ایزوتوپی مدیترانه نیز بصورت زیر است:

معادله ۴-۵:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 22$$

که شیب برابر و عرض از مبدا (d-excess) بیشتر از خط بارش جهانی دارد که نشان‌گر تشکیل ابر در شرایط رطوبتی متفاوت است. برای رسم خط بارش ایزوتوپی منطقه تخت سلیمان از داده‌های ایزوتوپی نمونه‌های

برداشت شده از ارتفاعات مختلف منطقه بدست آمده است. البته گرچه تعداد نمونه‌ها کم می‌باشد و برای رسم آن به تعداد بیشتری داده نیاز می‌باشد، اما با توجه به اینکه در طول فصل بارش دسترسی به این منطقه کوهستانی و برف گیر بسیار سخت بوده و برداشت همین تعداد نمونه نیز به سختی انجام شده است، بنابراین فقط برای اطمینان از مقادیر ایزوتوپی بارش بعنوان تنها منبع تغذیه کننده سفره کارستی منطقه، این نمونه‌ها برداشت شده است و در شرایط موجود با توجه به تنوع داده‌ها در ارتفاعات مختلف می‌توان از آن بعنوان خط بارش ایزوتوپی محلی نیز استفاده کرد. شکل ۴-۲۱ پراکندگی نمونه‌های بارش در منطقه را نشان می‌دهد. مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در نمونه برف منطقه بین $-۸,۴$ تا $-۱۰,۱$ و مقدار $\delta^2\text{H}$ بین $-۶۱,۲$ تا $-۴۷,۹$ متغیر است. معادله بدست آمده برای خط بارش منطقه تخت سلیمان بصورت زیر می‌باشد:

معادله ۴-۶:

$$\delta^2\text{H}=7.9\delta^{18}\text{O} + 19.6$$

که دارای شیب و عرض از مبدا کمتری نسبت به خط بارش جهانی و مدیترانه می‌باشد که احتمالاً به دلیل تبخیر ثانویه است. شیب خط بارش منطقه تقریباً برابر با خطوط ایزوتوپی مربوط به غرب کشور همچون خط ایزوتوپی منطقه خراسان ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+20.4$) و خط منطقه الوند کرمانشاه ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+18.5$) و حتی شیراز ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+20$) می‌باشد که می‌تواند دلالت بر نقش عمده بارش‌های مدیترانه‌ای در این مناطق باشد؛ ولی نسبت به خط مریوان ($\delta^2\text{H}=7.5\delta^{18}\text{O}+9.1$)، تهران ($\delta^2\text{H}=6.4\delta^{18}\text{O} + 0.2$)، رفسنجان ($\delta^2\text{H}=5.9\delta^{18}\text{O}+13.1$)، اصفهان ($\delta^2\text{H}=7.1\delta^{18}\text{O}+12.3$) مشهد ($\delta^2\text{H}=7.1\delta^{18}\text{O}+11.2$) و دماوند ($\delta^2\text{H}=7.6\delta^{18}\text{O}+8.9$) و حتی خط جوی ایزوتوپی کشور ترکیه ($\delta^2\text{H}=7.7*\delta^{18}\text{O}+13.1$) متفاوت است که بدلیل منشاهای متفاوت و یا رخداد پدیده‌های ثانویه در طول تشکیل و رخداد بارش در هر منطقه می‌باشد.

مقدار دوتریم اضافه (d-excess) در نمونه‌های منطقه مورد مطالعه نیز در حدود ۱۹ تا ۲۰ پرمیل می‌باشد که

از خط بارش جهانی بیشتر و در حدود بارش‌های مدیترانه است. مقدار دوتریم مازاد به شرایط رطوبتی زمان تشکیل ابر و هم‌چنین به مقدار کمتر به تبخیر ثانویه در زمان تشکیل بارش بستگی دارد و رابطه عکس با رطوبت دارد. اما تبخیر ثانویه باعث افزایش مقداری دوتریم مازاد می‌شود. بنابراین ابرهای مدیترانه‌ای در شرایط رطوبتی کمتری نسبت به متوسط بارش‌های جهانی (رطوبت ۸۵ درصد) تشکیل شده‌اند که منشا بارش‌های منطقه تخت سلیمان هستند.

۴-۱۲-۲- بررسی خصوصیات ایزوتوپی چشمه‌ها و تعیین ارتفاع تغذیه

داده‌های مربوط به ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن برای چشمه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه در جدول (۴-۶) ارائه گردیده است. جهت تفسیر داده‌ها از مقادیر اندازه‌گیری شده ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن نمونه‌های بارش منطقه‌ی مورد مطالعه که عمدتاً بصورت برف بوده است، نیز استفاده شده است. مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در آب چشمه‌ها بین ۹- تا ۱۰.۵- و مقدار $\delta^2\text{H}$ بین ۶۲.۶- تا ۵۸.۹- متغیر می‌باشند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که نمونه‌های چشمه‌های مورد مطالعه نزدیک خط آب جوی جهانی و بالای آن و در محدوده نمونه‌های آب جوی محلی و خط بارش مدیترانه پلات گردیده‌اند (شکل ۴-۲۰). با توجه به اینکه منشا اکثر بارش‌های ایران، مدیترانه‌ای می‌باشد، بنابراین منشا اولیه آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، بارش محلی با منشا مدیترانه‌ای است. موقعیت چشمه‌های منطقه بر روی دیاگرام بر روی ترکیب ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن نشان‌گر آن است که این چشمه‌ها بیشتر از برف‌هایی که در طول زمستان رخ داده‌اند، تغذیه می‌شوند. نمونه ایزوتوپی که در زمستان از چشمه تخت سلیمان تهیه گردیده شده است (Sp1) دارای کم‌ترین میزان ایزوتوپی و چشمه چوپلی کانی شفا (Sp4) دارای بیش‌ترین مقدار است. علت بیشتر بودن مقدار ایزوتوپی چشمه (Sp4) می‌تواند ارتفاع تغذیه کم‌تر آن باشد. بنابراین حوضه آبگیر چشمه Sp1 دارای ارتفاع بالاتری از چشمه‌های دیگر بوده و عمدتاً از ذوب برف‌های منطقه تغذیه می‌شود.

جدول (۴-۶) ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب چشمه‌های تخت سلیمان

Sample	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$	$\delta^2\text{H} \text{ ‰}$
Sp1	-۱۰,۵۸	-۶۲,۶۶
Sp1	-۱۰,۵	-۶۱,۹۷
Sp2	-۹,۷۲	-۵۳,۲۹
Sp3	-۹,۱۱	-۵۶,۵۵
Sp4	-۹,۰۹	-۵۸,۹

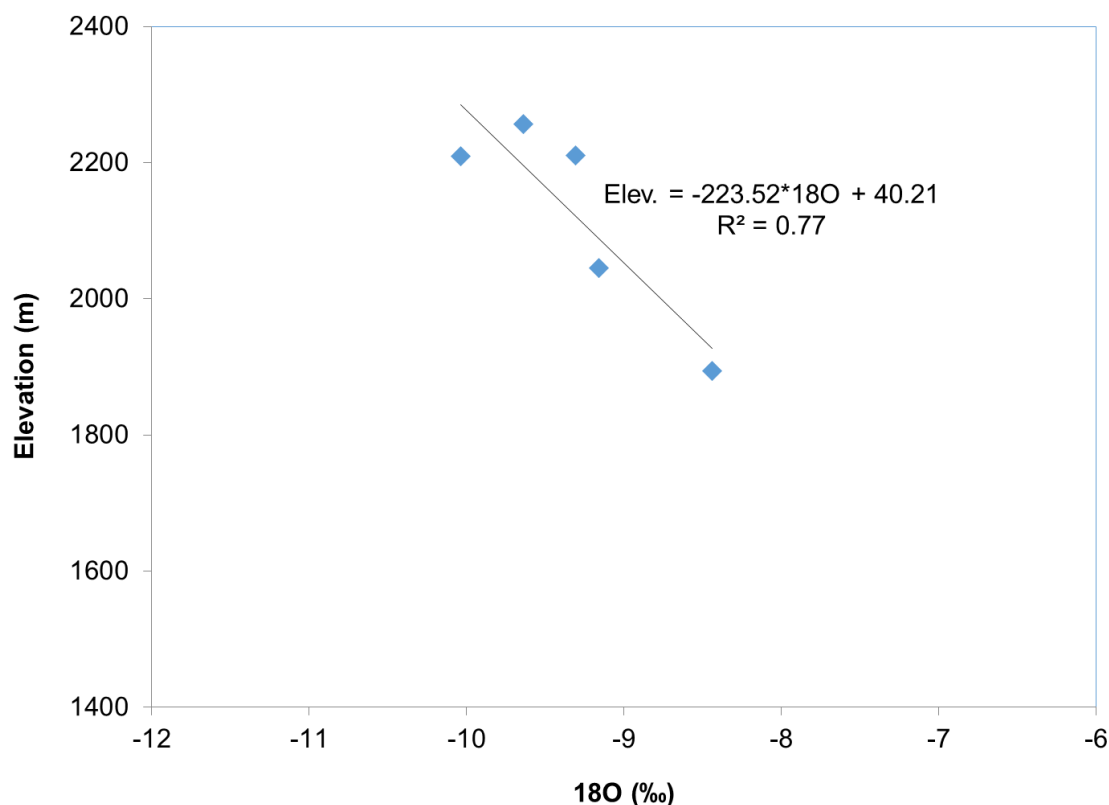
رابطه بین ارتفاع محل نمونه‌گیری و ترکیب ایزوتوپی در نمونه‌های برف در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. به طور کلی ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های باران با ارتفاع رابطه معکوس دارند و با افزایش ارتفاع مقادیر آن‌ها در بارش‌ها سبک‌تر می‌شوند. با توجه به شکل، در این منطقه رابطه ارتفاع-مقدار اکسیژن ۱۸ بصورت زیر می‌باشد:

معادله ۴-۷:

$$\text{Elevation (m)} = -223.5 \delta^{18}\text{O} + 40.2$$

با استفاده از این رابطه می‌توان ارتفاع تغذیه و محدوده حوضه آبرگیر چشمه‌ها را مشخص کرد. در این منطقه مقدار کاهش اکسیژن ۱۸ در حدود ۰.۲۴ پرمیل به ازاء افزایش هر ۱۰۰ متر ارتفاع می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار ایزوتوپی چشمه اصلی تخت سلیمان بطور متوسط در حدود ۱۰- پرمیل می‌باشد، بنابراین مقدار ارتفاع تغذیه و محدوده حوضه آبرگیر آن در حدود ۲۵۰۰ متر می‌باشد. بیش‌ترین مقدار ایزوتوپی نیز مربوط به چشمه Sp4 بوده که در حدود ۹- پرمیل بوده است. با توجه به فرمول مربوطه، مقدار ارتفاع تغذیه آن نیز در حدود ۲۰۰۰ متر است. بنابراین ارتفاع تغذیه چشمه‌ها بین ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر متغیر است که با توجه به توپوگرافی منطقه، این ارتفاعات در منطقه بخصوص در بالادست چشمه تخت سلیمان وجود دارد. ارتفاعات ۳۰۰۰ متری در

فاصله حدود ۸ کیلومتری نسبت به چشمه اصلی قرار داشته که مربوط به ارتفاعات آهکی تاقدیس بلقیس هستند و نشان گر منشا محلی چشمه‌ها نیز است.



شکل ۴-۲۱: رابطه اکسیژن ۱۸ با ارتفاع در نمونه‌های بارش منطقه

۴-۱۳- تعیین مساحت حوضه آبرگیر در چشمه‌های کارستی مورد مطالعه

چشمه اصلی کارستی منطقه‌ی مورد مطالعه دارای مقدار دبی تخلیه ۶۵ لیتر بر ثانیه است. مقدار دبی این چشمه در طول فصول تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد که نشان گر غالب بودن جریان افشان در منطقه حوضه آبرگیر آن‌ها است. جهت تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌ها از رابطه زیر استفاده می‌گردد.

معادله ۴-۸:

$$V=P.I.A$$

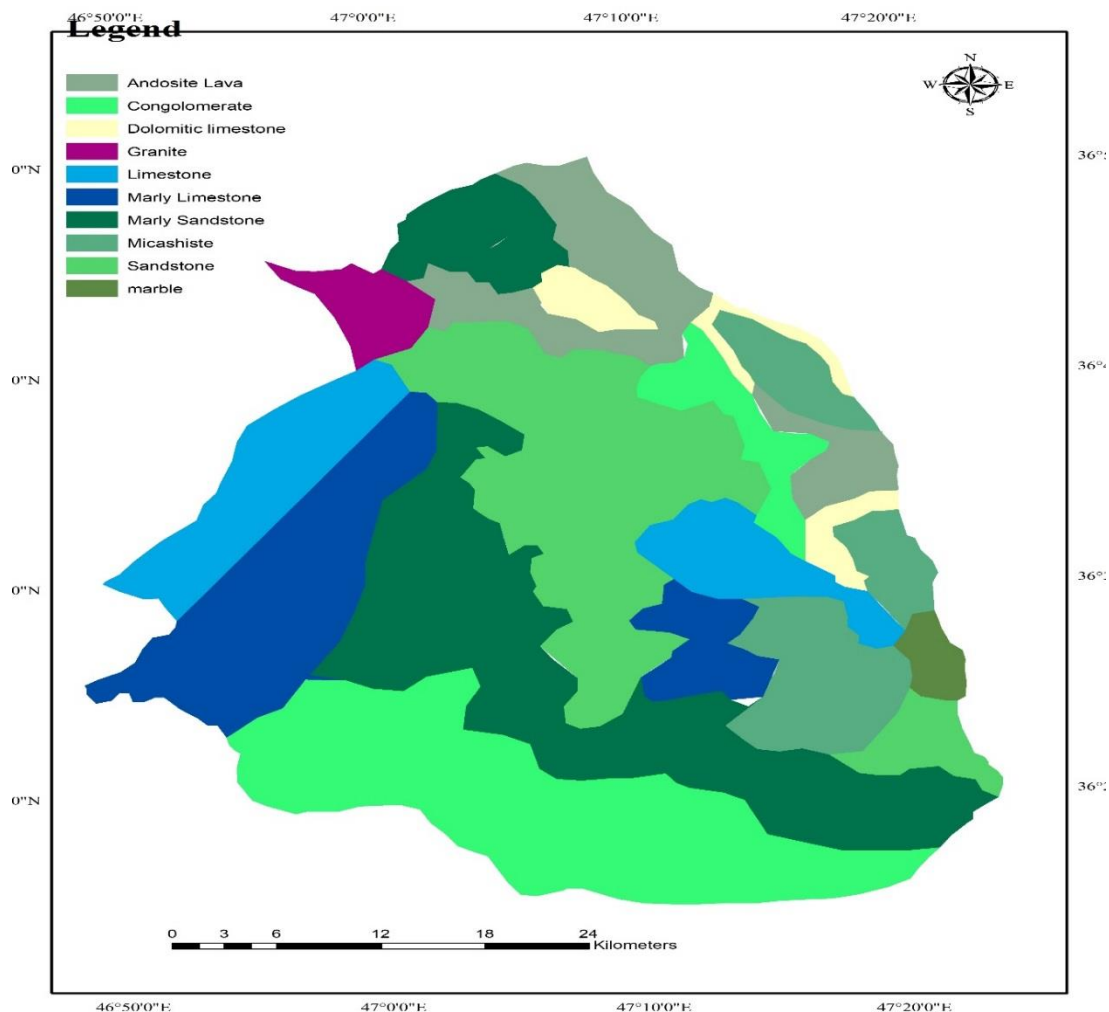
براساس معادله‌ی I میزان تغذیه سالانه، V حجم آب تخلیه شده، A مساحت منطقه و P میانگین بارندگی سالانه در منطقه می‌باشد. برای تعیین درصد تغذیه به آبخوان کارستی منطقه، از نرم افزار GIS جهت تلفیق لایه های اطلاعاتی مختلفی که بر روی تغذیه تاثیر گذارند استفاده شده است.

۴-۱۴- تهیه لایه های اطلاعاتی برای تعیین درصد تغذیه

مهم ترین عواملی که در منطقه مورد مطالعه بر روی درصد تغذیه سالانه تأثیر گذار هستند شامل لیتولوژی، شیب، جهت شیب، بارش، تراکم خطواره ها، تراکم آبراهه ها، عوارض کارستی و پوشش گیاهی می باشند. به منظور تعیین درصد تغذیه سالانه در منطقه مورد مطالعه لایه های اطلاعاتی عوامل فوق ذکر در محیط GIS تهیه شده است. سپس با اعمال وزدهای مناسب برای هر کدام از این لایه های اطلاعاتی و طبقه بندی هر پارامتر از دیدگاه درصد تغذیه، میانگین درصد تغذیه سالانه در بخش های مختلف منطقه برآورد شده است.

الف- لایه لیتولوژی

لیتولوژی های گوناگون، دارای نفوذپذیری متفاوتی می باشند. در نقشه زمین شناسی با توجه به انواع لیتولوژی های با تراوایی متفاوت و تأثیر آن ها بر میزان تغذیه می توان آن ها را تقسیم بندی و در نتیجه امتیازدهی نمود. مهم ترین لیتولوژی های منطقه که با توجه به بازدید صحرایی و نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه کورخود تشخیص داده شد شامل آهک، آهک دولومیتی، آهک مارنی، ماسه سنگ و کنگلومرا می باشد. سپس با توجه به میزان نفوذ هر کدام از لیتولوژی های فوق در منطقه مورد مطالعه، می توان آن ها را به لحاظ تاثیر گذاری بر درصد تغذیه، تقسیم بندی نمود. شکل ۴-۲۲ تقسیم بندی و امتیازدهی به لیتولوژی های مختلف موجود در منطقه را نشان می دهد. در این لایه مناطق دارای واحدهای آهکی دارای بیشترین ارزش و مناطق ماسه ای و مارنی دارای کمترین ارزش هستند.



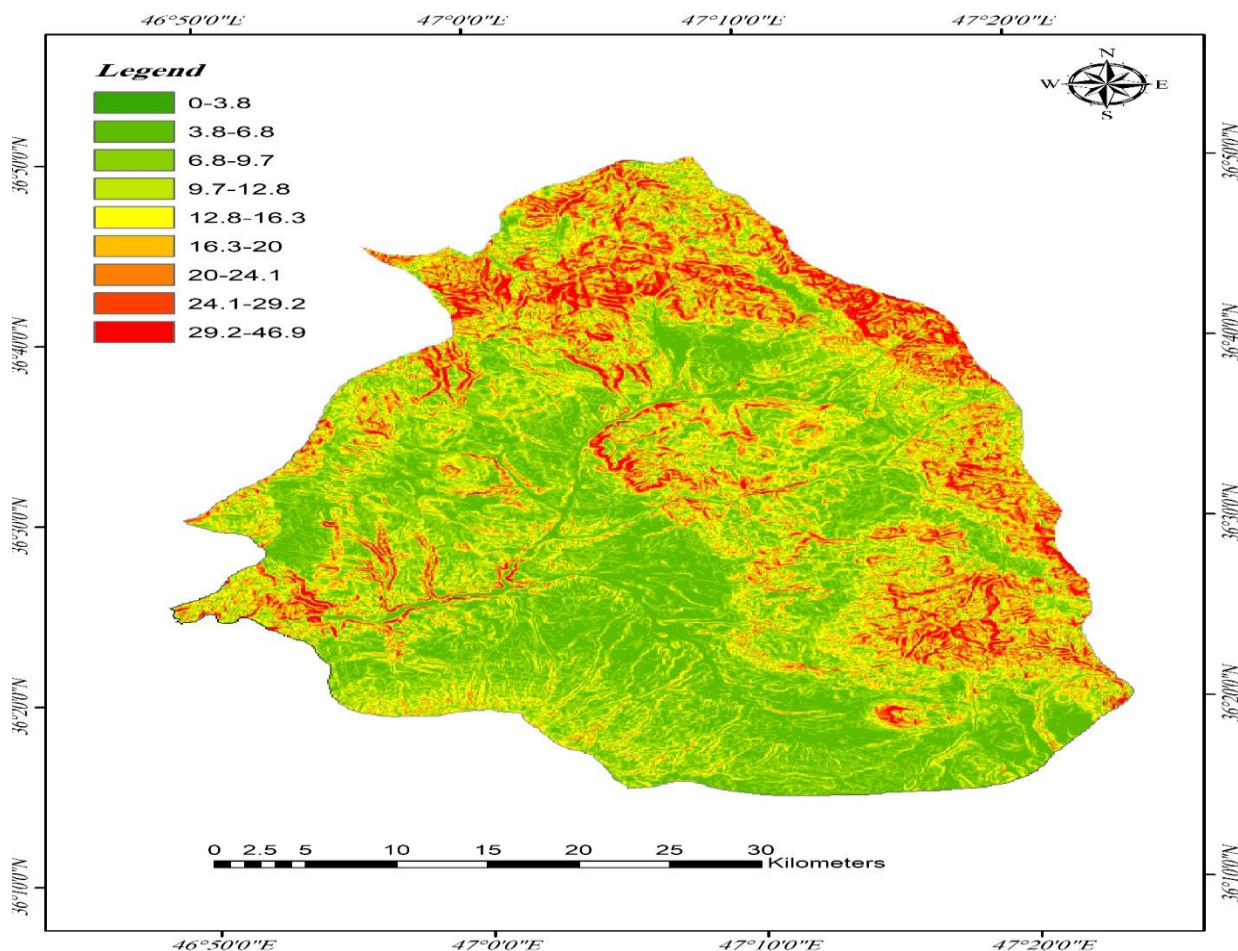
شکل ۴-۲۲- لایه لیتولوژی منطقه مورد مطالعه

ب- لایه مقدار شیب

شیب توپوگرافی یکی از عوامل ژئومورفولوژیک موثر بر مقدار نفوذ و در نتیجه مقدار تغذیه است. توپوگرافی سطح زمین با ایجاد تغییرات دما، میزان بارش، نوع پوشش گیاهی و نیز تبخیر نسبت به ارتفاع و همچنین با ایجاد شیب‌های مختلف و تاثیر آن در میزان رواناب تولید شده، میزان تغذیه و نهایتاً توسعه کارست حوضه موثر است. به این ترتیب که در شیب‌های کم، فرصت تغذیه بیشتر است و در مناطق پر شیب میزان تغذیه کم

می‌شود. بنابراین، شیب‌های مختلف را می‌توان بر اساس درجه تاثیرگذاری بر مقدار تغذیه، تقسیم‌بندی و امتیازدهی نمود به این ترتیب که به شیب‌های کم، ارزش بیشتر و به شیب‌های زیاد، ارزش کمتری داده است

شکل (۴-۲۳) لایه مقدار شیب منطقه را نشان می‌دهد.

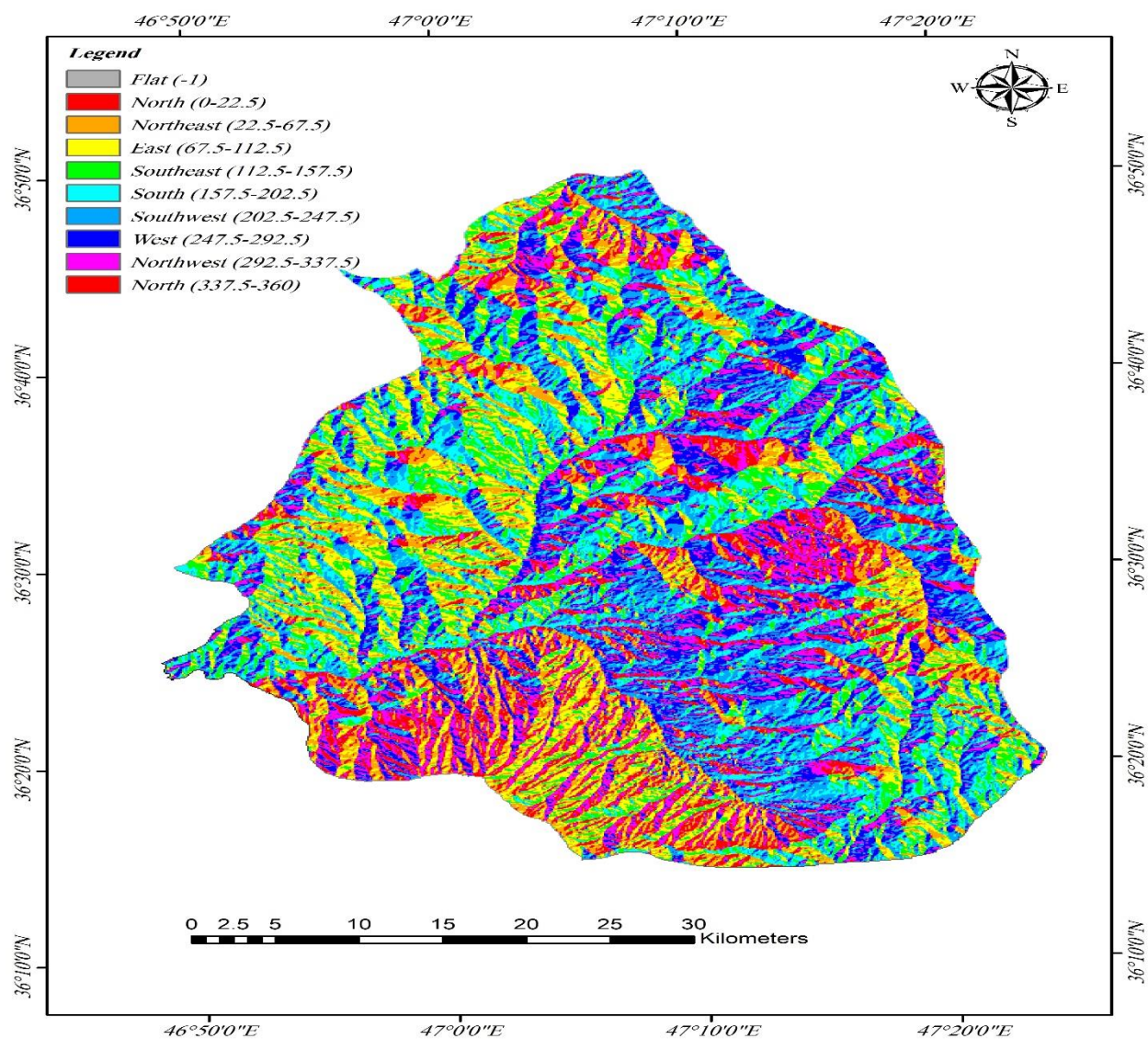


شکل ۴-۲۳: لایه شیب منطقه مورد مطالعه (واحد شیب به درجه است)

ج- لایه جهت شیب توپوگرافی

زاویه تابش خورشید در دامنه شمال و شمال شرق نسبت به دامنه جنوب و جنوب غرب متفاوت است و زمان ماندگاری برف بر روی دامنه‌ی شمالی بیشتر است و این باعث افزایش تغذیه می‌شود. با توجه به برف‌گیر بودن

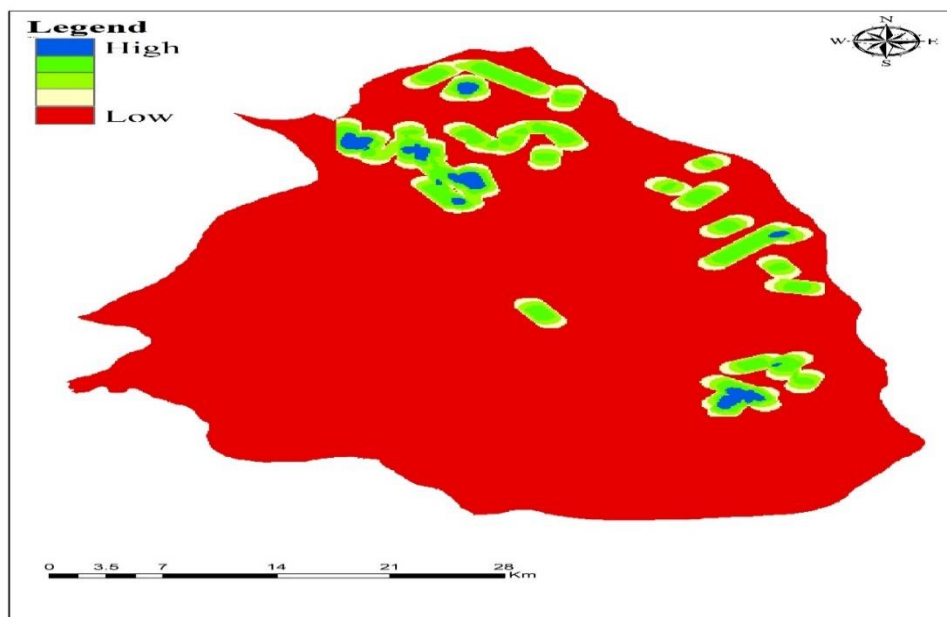
منطقه، لایه جهت شیب با استفاده از مدل رقومی منطقه تهیه شد (شکل ۴-۲۴). سپس در تابع Reclassify در GIS طبقه‌بندی شد. به دامنه‌های رو به شمال ارزش بیشتر و به دامنه‌های رو به جنوب ارزش کم‌تری تعلق گرفت.



شکل ۴-۲۴: لایه جهت شیب منطقه

د- لایه تراکم خطواره‌ها

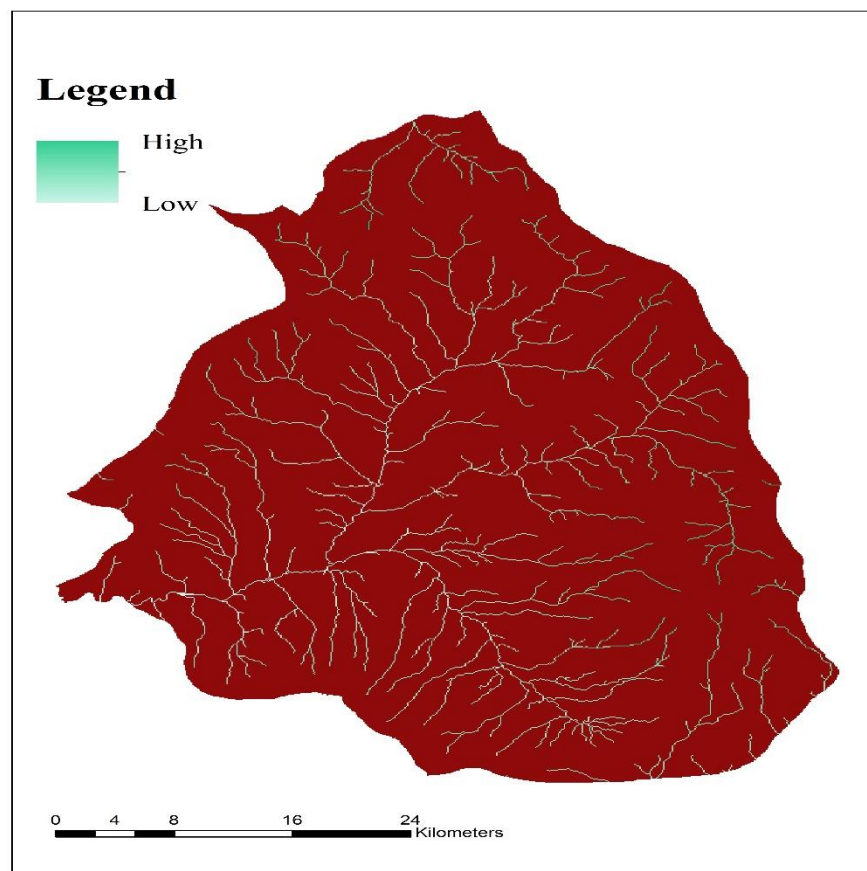
آنالیز خطواره‌ها و گسل‌ها نشان‌دهنده حرکت و ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد و امکان تغذیه به لایه‌های زیرین را فراهم می‌کند. گسل‌ها و شکستگی‌ها به عنوان یکی از نقاط ضعف در هر منطقه بوده و امکان نفوذپذیری بالایی دارند و در اثر انحلال تشکیل معابر زیرزمینی داده و جریان آب زیرزمینی در امتداد آن‌ها شکل می‌گیرد. دقیق‌ترین روش تهیه نقشه خطواره‌ها روش صحرایی است، اما به دلیل کم بودن زاویه دید و مشکلات ناشی از عملیات صحرایی، این موضوع مقدور نمی‌باشد. در عکس‌های هوایی نیز خطواره‌های بزرگ که از حد پوشش عکس‌های هوایی خارج می‌شوند به علت بزرگ مقیاس بودن نمی‌توانند آشکار شوند، اما با استفاده از تصاویر ماهواره‌های با میدان دید وسیع می‌توان نقشه‌های قابل اطمینان از خطواره‌ها فراهم کرد. جهت شناسایی شکستگی‌ها و گسل‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌های در نرم افزار Google earth استفاده شده است. نقشه تراکم با استفاده از نرم‌افزار ENVI تهیه شد (شکل ۴-۲۵). هرچه تراکم خطواره‌ها بیشتر باشد ارزش بیشتری داده شده است. نقش گسل در کنترل و انتقال آب زیرزمینی، بسته به شرایط گسل و وضعیت منطقه می‌تواند خنثی، مثبت و یا منفی باشد. گسل با ایجاد درز و شکاف و فرآیند برشی شدن و افزایش خوردشدگی و تخلخل ثانویه و یا معبر ورود آب به زون کارستی، می‌تواند دارای نقش مثبت باشند. در حالی که می‌تواند در موارد زیر دارای نقش منفی باشند، بدین صورت که جابجایی یک لایه ناتراوای عمیق در برابر لایه تراوا به عنوان سد عمل می‌کند که مانع حرکت و انتقال آب می‌شود. پرشدگی شکاف گسل‌ها با مواد ناتراوای متراکم مانند کلسیت و کوارتز یا رس، در مقدار نفوذ نقش منفی پیدا می‌کند و یا ممکن است یک زون کارستی با وجود داشتن شرایط لازم بدلیل فرار آب، از طریق گسل از تغذیه مناسبی برخوردار نباشد. از طرفی گسل‌هایی که ساز و کار فشارشی مسیرهای مناسبی برای جریان و انتقال آب زیرزمینی نیستند.



شکل ۴-۲۵: لایه خطواره‌های منطقه

۵- لایه تراکم آبراهه‌ها

از دیگر فاکتورهای موثر در مقدار تغذیه، پدیده‌های سطحی هم‌چون آبراهه‌ها می‌باشد. آبراهه‌ها در پرشیب - ترین مناطق تشکیل می‌شوند و با ایجاد رواناب تا حدودی در تغذیه آب نقش دارند و به عنوان مسیری برای عبور آب از ارتفاعات به سمت نقاطی با ارتفاعات به سمت نقاطی با ارتفاع کم محسوب می‌شوند. این لایه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه که در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد (شکل ۴-۲۶) جهت تصحیح احتمالی از نرم‌افزار Google earth استفاده شده است. آبراهه‌ها در مناطق با شیب کم و یا در محل عبور گسل‌ها اهمیت بیشتری دارند، زیرا آب مدت زمان بیشتری برای تغذیه در اختیار دارد. این در مورد آبراهه‌های رده بالاتر که حجم بیشتر از آب را در زمان طولانی‌تری در اختیار دارند بیشتر است.

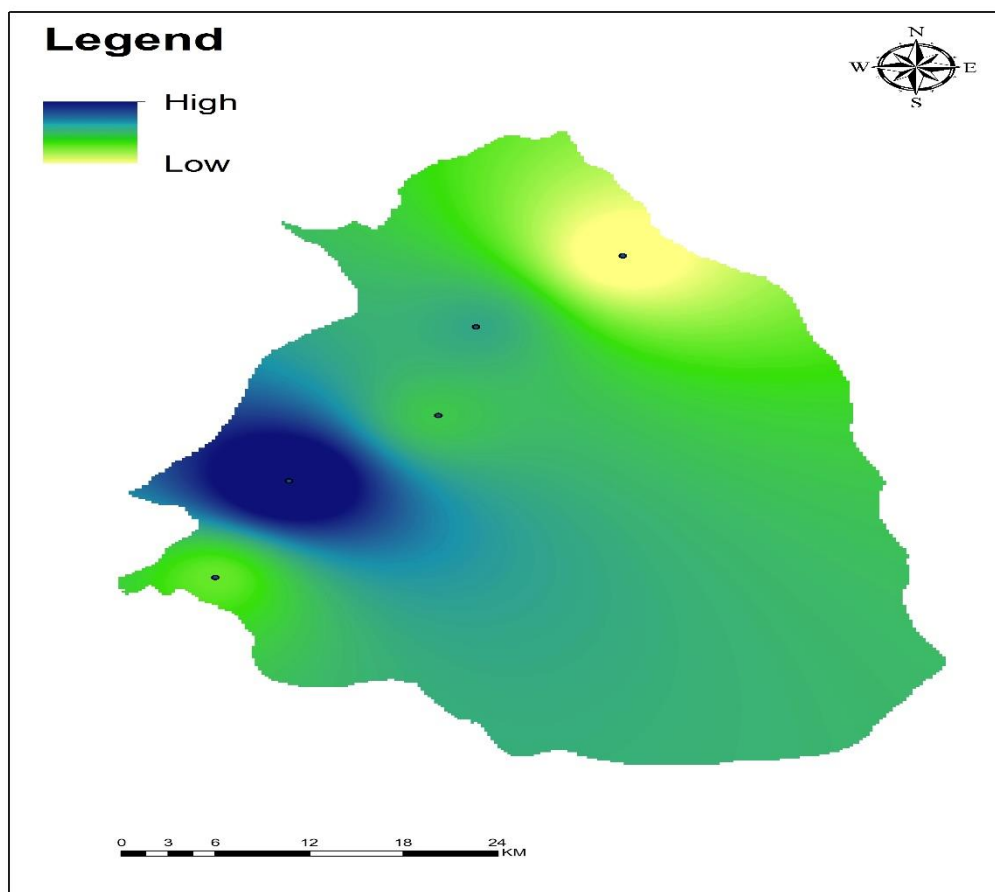


شکل ۴-۲۶: لایه آبراهه‌های منطقه

و- لایه بارش

بارش یکی دیگر از مهم‌ترین عواملی است که در تغذیه آب‌های کارستی یک سازند مستعد برای ذخیره آب، تاثیرگذار است. مقدار و نوع بارش جوی بسته به اقلیم و ارتفاع منطقه متفاوت است. هرچه مقدار و حجم بارش در ناحیه‌ای بیشتر باشد (با در نظر گرفتن یکسان بودن سایر شرایط)، مقدار آب نفوذ کرده به درون سفره کارستی بیشتر بوده و در نتیجه دبی خروجی از این سفره افزایش می‌یابد. نوع نزولات و شدت آن نیز در میزان تغذیه موثر است، به این ترتیب که بارش‌های سیل آسا و ناگهانی حجم زیادی رواناب تولید می‌کنند و در مقایسه با بارش‌های تدریجی و یا بارش‌های برف که فرصت بیشتری برای تغذیه دارند، اهمیت کمتری دارند. با

توجه به اهمیت بارش در نفوذ آب، اقدام به تهیه لایه‌ی بارش گردید (شکل ۴-۲۷).

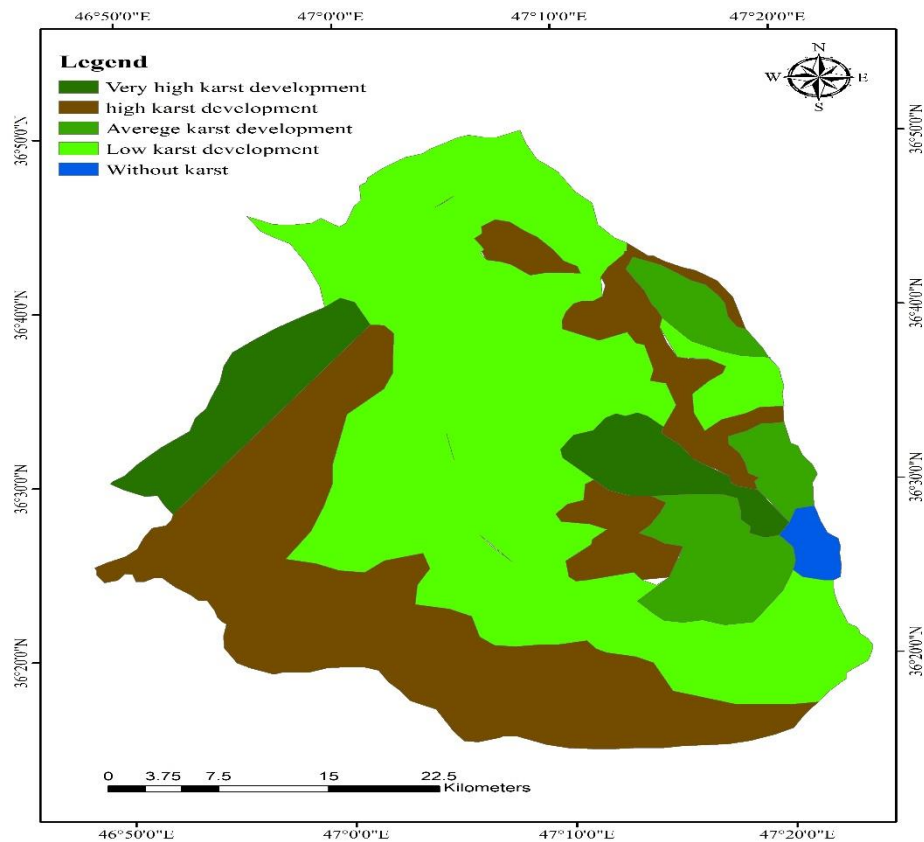


شکل ۴-۲۷: لایه بارش در منطقه

ز- لایه عوارض کارستی منطقه

تنوع اشکال کارست سطحی در سازندهای کربناته حاکی از انحلال‌پذیری خوب این سازندها می‌باشد. بنابراین گسترش این پدیده‌ها در منطقه می‌توانند نشان‌دهنده‌ی پدیده کارستی در عمق باشد. در بازدید از منطقه اشکال مختلف و فراوان کارست سطحی مشاهده شد. بنابراین به طور صریح می‌توان اظهار داشت که سنگ‌های در برگیرنده این پدیده‌ها از قابلیت انحلال بالایی برخوردارند و از آنجایی که ریزش‌های جوی منطقه قابل توجه، می‌باشد می‌توان انتظار محیطی مناسب جهت نفوذ و ذخیره آب‌های زیرزمینی را داشت. انواع پدیده‌ها کارست

سطحی قابل مشاهده در منطقه عبارتند از: انواع کارن، دره‌های خشک و تعداد محدود آب‌چاله که به طور قابل ملاحظه‌ای در نفوذپذیری موثرند قابل مشاهده است. مناطق با عوارض کارستی عمده شناسایی شده است و به صورت یک لایه اطلاعاتی به ArcGIS منتقل شد (شکل ۴-۲۸).

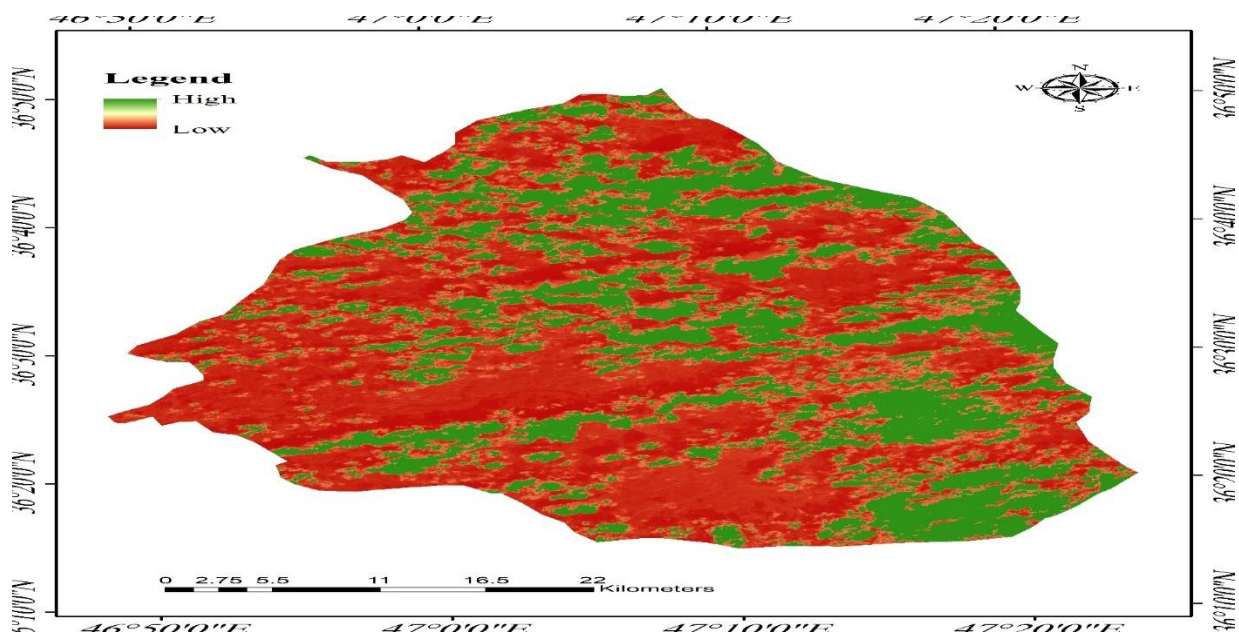


شکل ۴-۲۸: لایه عوارض کارستی در منطقه

ر- لایه پوشش گیاهی منطقه

گیاهان هم تاثیر مثبت و هم تاثیر منفی در توسعه کارست دارند. فشار ریشه‌ی گیاهان سبب تخریب و شکستگی سنگ‌ها و ایجاد فضای نفوذپذیر در کنار آن می‌شود. وجود برگ گیاهان هوموس خاک را افزایش می‌دهد و افزایش CO₂ حاصل از تغذیه ریشه‌ها باعث افزایش اسیدیته و افزایش انحلال سنگ کربناته می‌شود. ممانعت از فشرده شدن خاک و ایجاد رواناب‌های سطحی و در نتیجه افزایش نفوذ این جریانات و همچنین ایجاد سایه و

جلوگیری از تابش مستقیم خورشید بر خاک و کم شدن تبخیر از تاثیر مثبت پوشش گیاهی در توسعه کارست می‌باشد. اما از سوی دیگر در صورت کم بودن میزان بارندگی در مناطقی که پوشش گیاهی متراکم و انبوه به ویژه درختی از رسیدن آب‌های جوی به سطح زمین ممانعت می‌کند و این آب‌ها مستقیماً از سطح برگ‌ها و شاخه درختان تبخیر و مجدداً به جو برمی‌گردد (شکری ۱۳۹۰). با توجه به منطقه مورد مطالعه که دارای شیب زیاد و میزان بارندگی بالایی دارد یک عامل مثبت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تراکم پوشش گیاهی مختلف را می‌توان بر اساس درجه تأثیر گذاری بر تغذیه، تقسیم‌بندی و امتیازدهی نمود به این ترتیب، به تراکم بالای پوشش گیاهی، ارزش بیشتری و تراکم کم پوشش گیاهی ارزش کمتری داده شده است (شکل ۴-۲۹).



شکل ۴-۲۹: لایه پوشش گیاهی در منطقه

۴-۱۵- هم مقیاس سازی و وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی

به منظور تعیین تغذیه منطقه، لایه‌های اطلاعاتی بدست آمده شامل تراکم آبراهه‌ها، تراکم خطواره‌ها، لیتولوژی، شیب، جهت شیب، بارش، عوارض کارستی و پوشش گیاهی با استفاده از روش کارشناسی هم مقیاس شدند و در

محدوده صفر تا ۹ طبقه‌بندی شده‌اند. ارزش داده شده به هر طبقه از لایه‌های اطلاعاتی در (جدول ۷-۴) ارائه شده است. به منظور تلفیق و تحلیل داده‌ها از روش‌های هم‌پوشانی وزن‌دار شده (overlay Weighted) استفاده گردید. برای استفاده از روش هم‌پوشانی، با توجه به نظر کارشناسی وزن هر لایه مشخص گردید (جدول ۷-۴). وزن لایه‌های اطلاعاتی بدست آمده کارشناسی را نشان می‌دهد. در این روش به هر یک از رده‌های لایه‌های اطلاعاتی یک ارزش (score) داده شده است. این وزن‌ها طوری انتخاب شده‌اند که از یک طرف با واقعیات فیزیکی مطابقت داشته و از Weighted Overlay محاسبه به این صورت است که وزن هر لایه اطلاعاتی را در ارزش تک‌تک پیکسل‌های این لایه ضرب می‌کند و سپس باهم جمع و در نهایت نقشه رستری به دست می‌آید (شکل ۴-۳۰).

جدول ۷-۴: ارزش‌دهی و وزن‌دهی به لایه‌های مختلف

لایه اطلاعاتی	تقسیم‌بندی لایه‌های اطلاعاتی	ارزش	وزن	لایه اطلاعاتی	تقسیم‌بندی لایه‌های اطلاعاتی	ارزش	وزن
جهت شیب	شمال	۹	۱۲	میزان بارش	۴۰۰-۵۰۰	۳	۱۳
	شمال شرق	۹			۵۰۰-۶۰۰	۴	
	جنوب	۵			۶۰۰-۷۰۰	۵	
	جنوب غرب	۱			۷۰۰-۸۰۰	۶	
	جنوب شرق	۲			۸۰۰-۹۰۰	۷	
	شرق	۳			۹۰۰-۱۰۰۰	۸	
	غرب	۴			۱۰۰۰-۱۱۰۰	۹	
	صاف	۴					
		۶					
لیتولوژی	آهک	۹	۹	میزان شیب	۰-۳,۸	۹	۵
	آهک دولومیتی	۷			۳,۸-۹,۷	۸	
	آهک مارنی	۴			۹,۷-۱۶,۳	۷	
	کنگومرا	۲			۱۶,۳-۲۴,۱	۶	
	مارن	۲			۲۴,۱-۲۹,۲	۵	

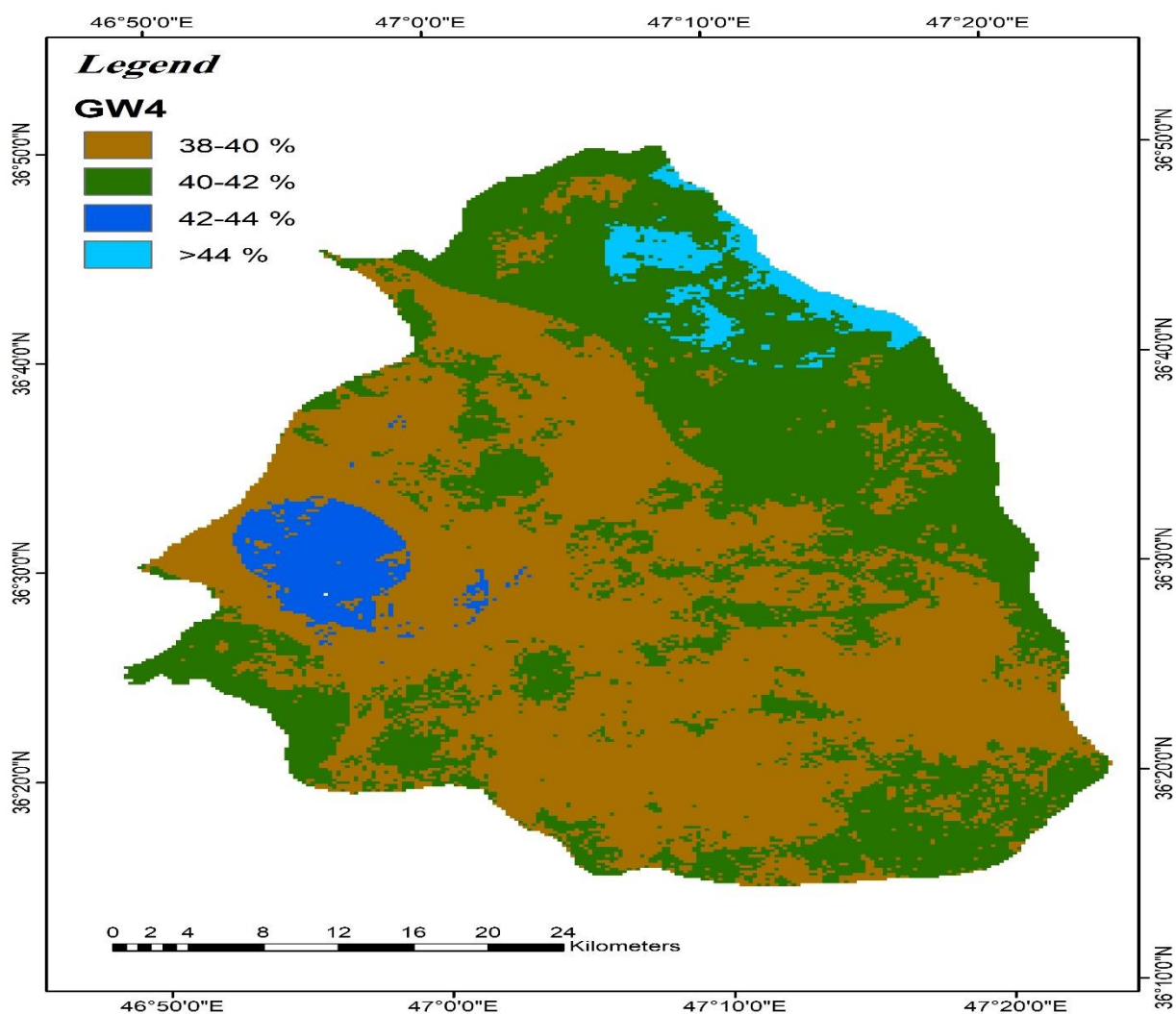
	۳	۲۹,۲-۴۶,۹			۲		
۸	۲	۰-۲۵	تراکم آبراهه	۲۰	۹	کارست با توسعه خیلی زیاد	عوارض کارستی
	۴	۲۵-۵۰			۸	کارست با توسعه زیاد	
	۷	۵۰-۷۵			۶	کارست با توسعه متوسط	
	۹	75<			۴	کارست با توسعه کم	
					۲	کارست با توسعه خیلی کم	
۱۵	۲	۰-۲۰	تراکم خطواره	۱۸	۹	خیلی زیاد	پوشش گیاهی
	۴	۲۰-۴۰			۸	زیاد	
	۶	۴۰-۶۰			۶	متوسط	
	۸	۶۰-۸۰			۴	کم	
	۹	80<			۲	خیلی کم	

۴-۱۶- تعیین مقدار تغذیه منطقه

برای تعیین هر هشت لایه اطلاعاتی (لیتولوژی، تراکم خطواره، شیب، جهت شیب، عوارض کارستی، تراکم خطواره، بارش و تراکم آبراهه) که در مرحله قبل تهیه شدند، به صورت لایه‌های اطلاعاتی رستری با پیکسل دارای اندازه یکسان (۱۰۰*۱۰۰متر) در قسمت Weighted Overlay برنامه GIS با هم تلفیق شدند. نهایتاً با اجرای برنامه، مقدار تغذیه منطقه بدست آمد. نتیجه این ترکیب نقشه‌ای رستری شد که در آن هر پیکسل دارای ارزش منحصر به فردی است و این ارزش نمایان‌گر مقدار تغذیه آن پیکسل می‌باشد. در این مرحله با توجه به نظر کارشناسی و مطالعات گذشته برای هر فاکتور موثر در میزان تغذیه جهت وزن‌دهی به لایه‌ها، وزنی متناسب با آن لایه در میزان تغذیه در نظر گرفته شد. شکل (۴-۳) نقشه طبقه‌بندی شده، وضعیت مقدار تغذیه در منطقه را نشان می‌دهد. درصد تغذیه و مساحت هر رده از نواحی مختلف در چهار رده دسته‌بندی شده است که در جدول (۴-۸) آمده است. برای بدست آوردن میزان تغذیه سالانه، با استفاده از معادله (۴-۸) حجم تغذیه

سالیانه بدست آمد.

در منطقه‌ی مورد مطالعه، درصد نفوذ بارش در حدود ۴۵ درصد و مقدار بارش سالیانه حدود ۴۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادله (۴-۸) حوضه آبرگیر منطقه مورد مطالعه محاسبه گردید. مجموع حجم تخلیه‌ی سالیانه‌ی چشمه‌ی مذکور، حدود ۲ میلیون متر مکعب محاسبه شده و مساحتی لازم برای تغذیه چشمه در حدود ۱۰ کیلومتر مربع برآورد گردیده است. با توجه به گسترش سازندهای کربناته در ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری در بخش‌های شمالی چشمه تخت سلیمان، حوضه آبرگیر این چشمه در این مناطق قرار دارد.



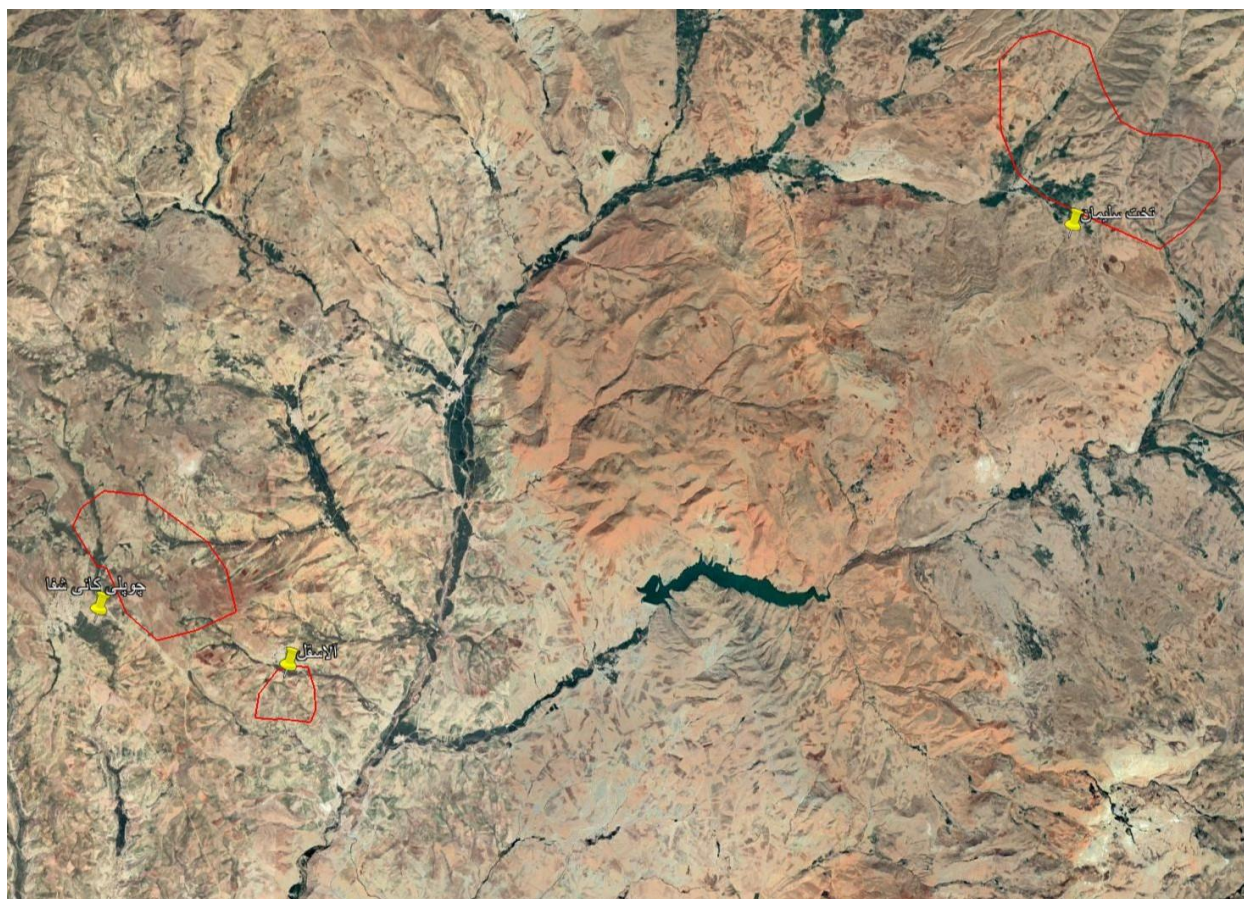
شکل ۴-۳: نقشه نهایی تغذیه منطقه

جدول ۴-۸: درصد تغذیه سالانه محاسبه شده و مساحت هر رده

تغذیه سالانه	مساحت (Km^2)
۳۸-۴۰	۲۱۵
۴۰-۴۲	۱۶۵
۴۲-۴۴	۱۴
>۴۴	۱۰

۴-۱۷- ارزیابی کلی بیلان هیدروژئولوژیکی منطقه کارستی تخت سلیمان

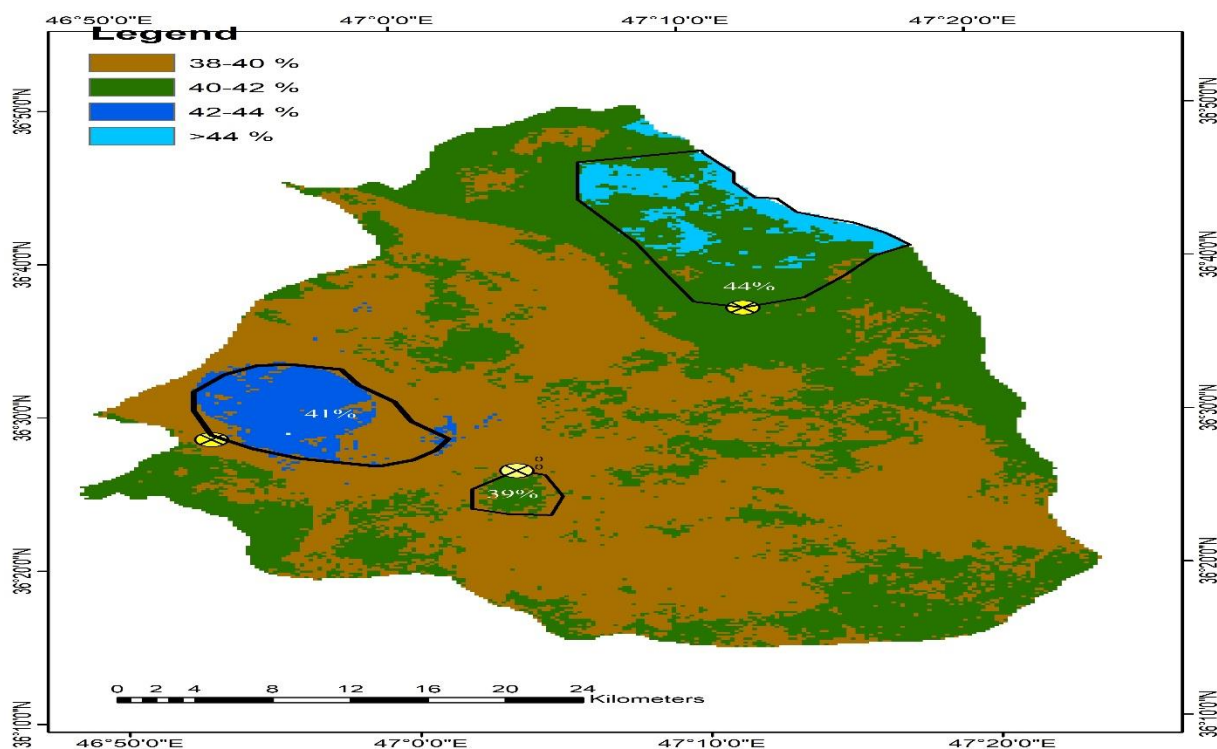
بیلان هیدروژئولوژیکی در یک سفره‌ی آب زیرزمینی محاسبه مقدار حجم آب ورودی به سفره، حجم آب خروجی از آن و در نهایت تغییر در حجم ذخیره سفره در طول یک دوره خاص می‌باشد. هدف عمده از ارزیابی بیلان در سازندهای کارستی منطقه این است که پس از واسنجی‌های نهایی مشخص شود که حجم کل آب تخلیه شده از چشمه‌های تخت سلیمان، آلاسقل و چوپلی کانی شفا با حجم تغذیه در منطقه مورد مطالعه چه نسبتی دارد. برای محاسبه و برآورد بیلان آب چشمه‌های کارستی این منطقه، مساحت رخنمون سازندهای آهکی کارستی، میانگین بارندگی و درصد تغذیه مشخص گردید. مساحت سازندهای منطقه مورد مطالعه حدوداً ۲۴۰ کیلومتر مربع، میانگین بارندگی این منطقه تقریباً ۵۳۰ میلی‌متر و از درصد تغذیه تعیین شده در بخش قبل حدوداً ۴۲ درصد می‌باشد. میزان حجم تغذیه سالانه در این منطقه حدوداً ۶۰ میلیون متر مکعب بوده است. مجموع حجم تخلیه سالیانه چشمه‌ها حدوداً ۴۳,۵ میلیون متر مکعب بوده است. بنابراین این چنین می‌توان اظهار نظر نمود که کوه‌های منطقه علاوه بر تامین آب چشمه‌ها ذخیره بیشتری دارد. شکل (۴-۳۱) موقعیت حوضه آبگیر چشمه‌های مورد نظر را نشان می‌دهد



شکل ۴-۳۱: موقعیت حوضه آبگیر چشمه‌های تخت سلیمان، آلاسقل و چوپلی کانی شفا در منطقه مورد مطالعه

۴-۱۸- تعیین حوضه آبگیر چشمه کارستی تخت سلیمان

در منطقه مورد مطالعه ابتدا با استفاده از روش زمین‌شناسی که شامل وضعیت چینه‌شناسی منطقه، ژئومورفولوژی منطقه، تکتونیک منطقه و توپوگرافی منطقه می‌باشد، اقدام به تعیین مرز اولیه حوضه آبگیر چشمه‌های مهم منطقه شده است.



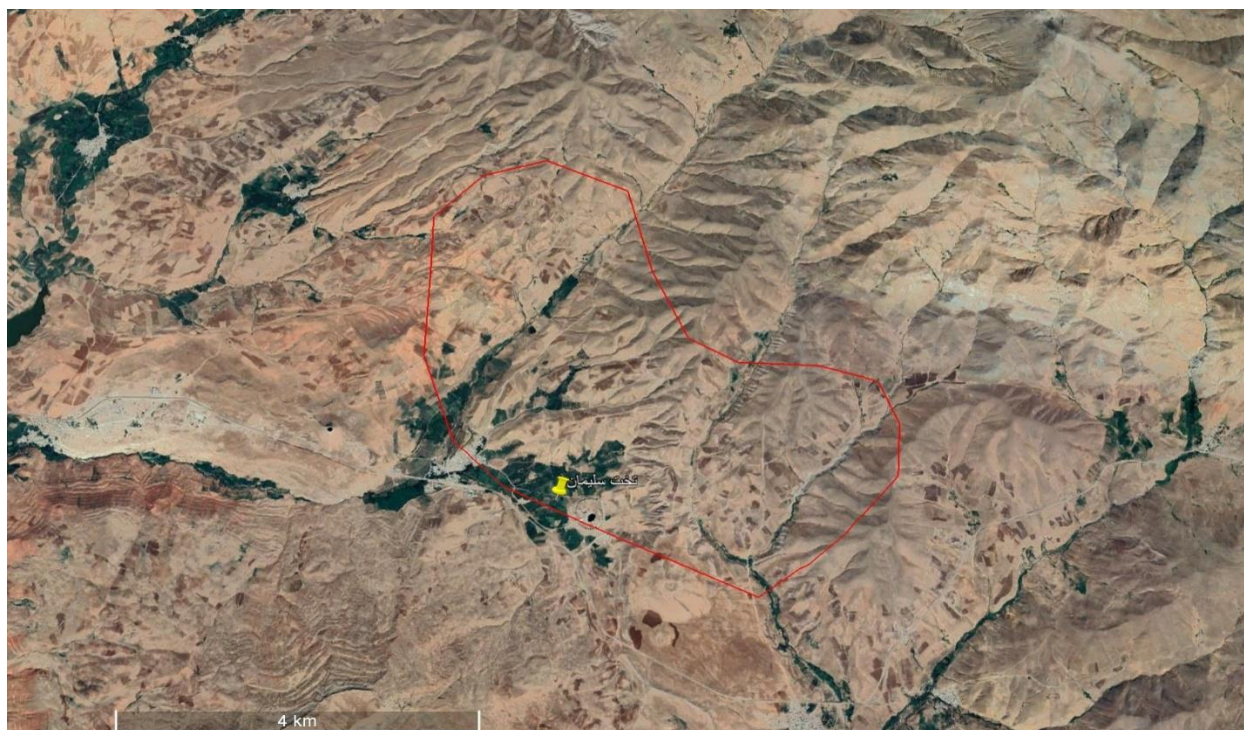
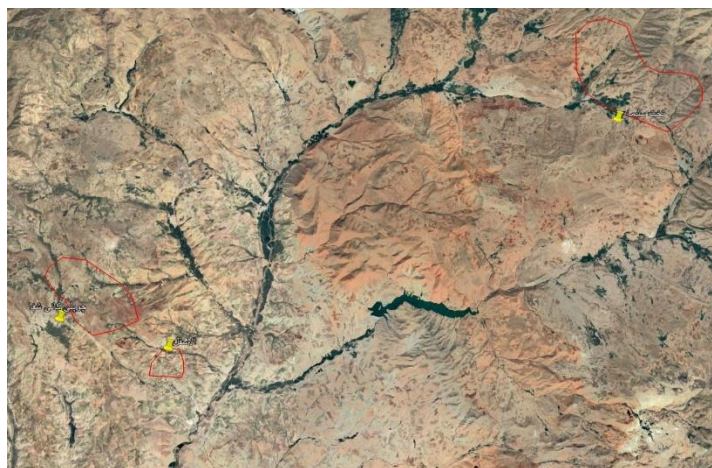
شکل ۴-۳۲: موقعیت و میزان تغذیه حوضه آبرگیر

با استفاده از روش بیلان هیدرولوژیکی، محدوده حوضه آبرگیر اولیه چشمه‌ها اصلاح شد، به این ترتیب که حجم تغذیه بدست آمده در حوضه آبرگیر چشمه‌ها، مورد مقایسه قرار گرفت. در این مرحله، چنانچه اختلاف قابل توجه‌ای بین تخلیه سالانه چشمه‌ها با میزان حجم تغذیه بدست آمده وجود نداشته باشد و میزان خطای نسبی بین آن‌ها اندک باشد، حوضه آبرگیر ترسیم شده اولیه، مورد تایید قرار می‌گیرد. شکل (۴-۳۲) میزان درصد تغذیه هر کدام از حوضه‌های آبرگیر را با توجه به میزان نفوذپذیری هر رده نشان می‌دهد.

۴-۱۱-۱- تعیین حوضه آبرگیر چشمه تخت سلیمان

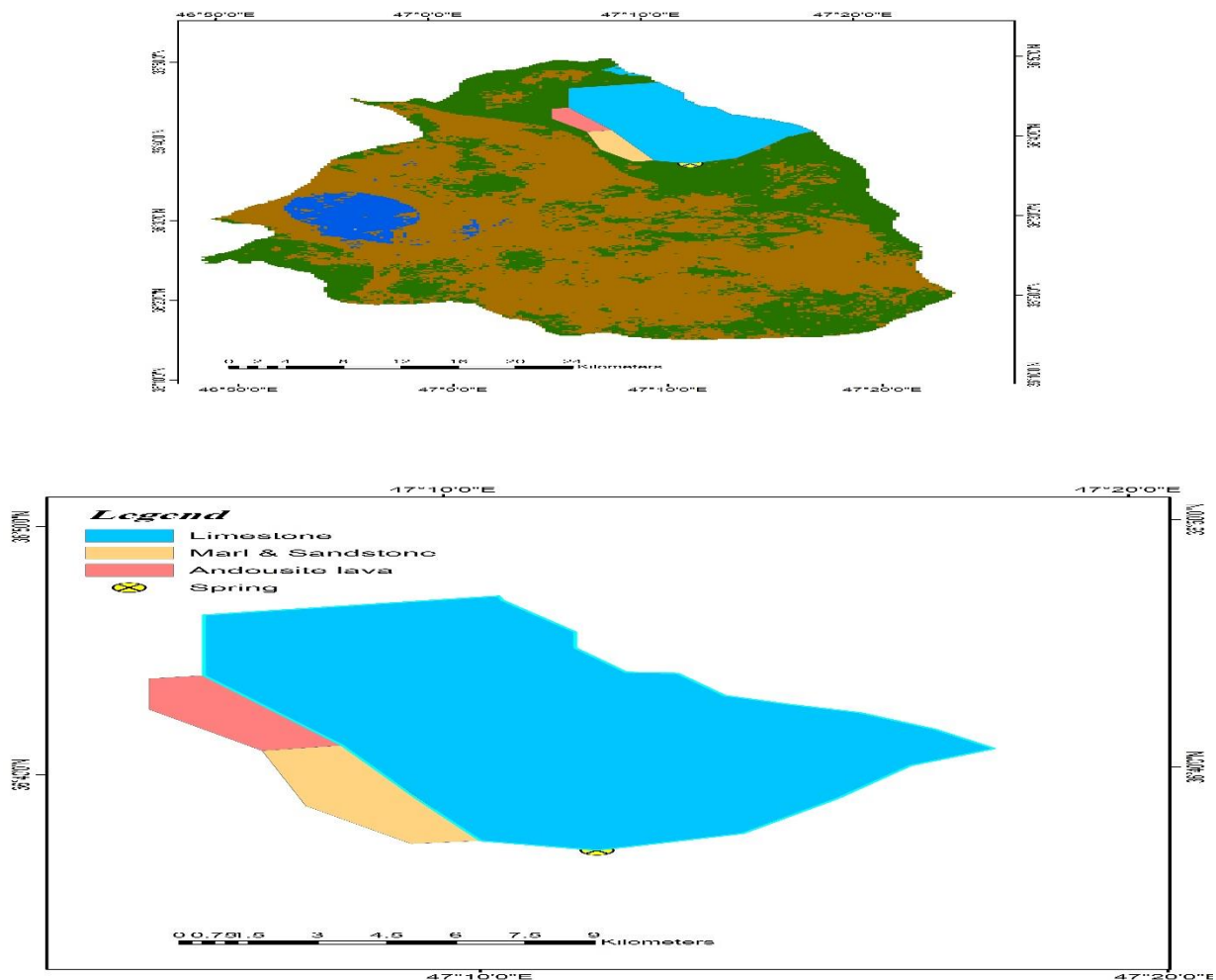
برای تعیین محدوده احتمالی حوضه آبرگیر این چشمه از روش زمین‌شناسی و بیلان هیدروژئولوژیکی استفاده شده است. ابتدا با توجه به توالی چینه‌شناسی، وضعیت تکتونیک و مورفولوژی منطقه محدوده احتمالی حوضه آبرگیر اولیه چشمه تعیین شد. این محدوده بخشی کوه‌های کارستی منطقه می‌باشد که سازند قم را دربر

می‌گیرد. به طور کلی، محدوده حوضه آبگیر با توجه به عملکرد گسل زندان سلیمان در منطقه و شیب لایه‌های زمین‌شناسی که با شیب به سمت شمال قرار گرفته‌اند، حدوداً ۱۰ کیلومترمربع تعیین شد. همان‌طور در شکل (۴-۳۳ و ۴-۳۴) نشان داده شده در تمام این منطقه امکان حرکت آب زیرزمینی به سمت چشمه از نظر هیدرویکی وجود دارد.



شکل ۴-۳۳: موقعیت حوضه آبگیر چشمه تخت سلیمان در Google earth

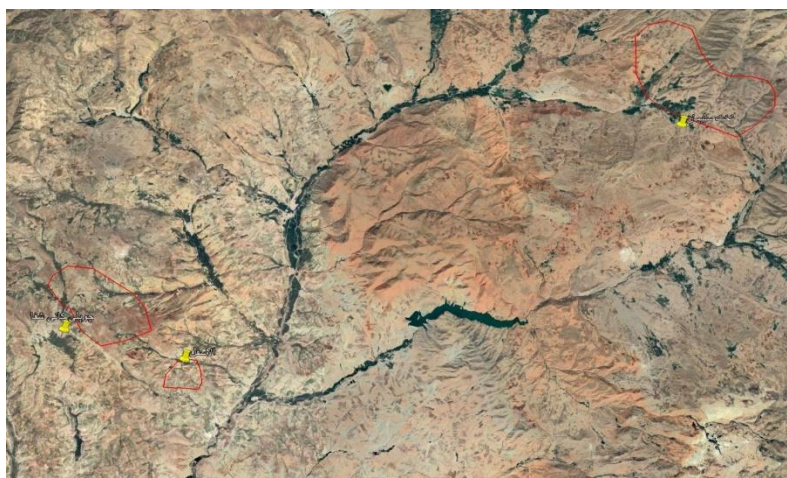
پس از بررسی‌های زمین‌شناسی برای تعیین حوضه آبرگیر اولیه چشمه، به منظور تأیید یا عدم تأیید محدوده تعیین شده برای حوضه آبرگیر چشمه تخت سلیمان، از روش بیلان هیدروژئولوژیکی استفاده شده است. برای این منظور میزان حجم تخلیه سالانه چشمه که حدوداً ۲ میلیون متر مکعب می‌باشد با حجم تغذیه بدست آمده از فرمول ۴-۸ که حدوداً ۵,۵ (با میزان بارندگی ۴۷۹ میلی‌متر و درصد تغذیه ۰,۴۵) مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به میزان خطای نسبی به دست آمده که حدود ۹ درصد است و با عنایت به اختلاف کم حجم تخلیه سالیانه چشمه و حجم تغذیه به دست آمده، حوضه آبرگیر اصلاح شده حدوداً ۱۰,۶ کیلومترمربع تعیین شد که با حوضه آبرگیر اولیه اختلاف ناچیزی دارد



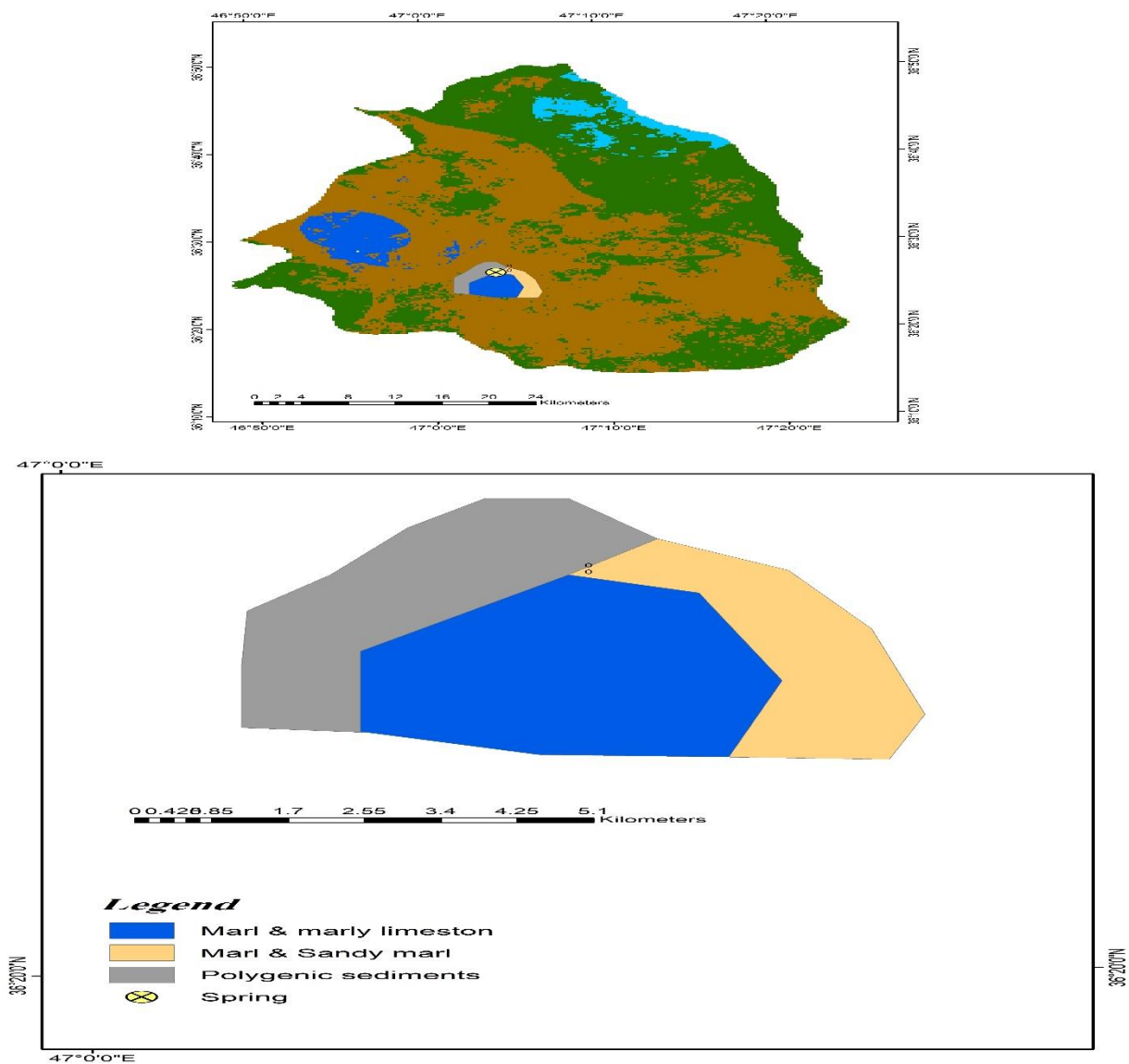
شکل ۴-۳۴: نقشه زمین‌شناسی حوضه آبرگیر چشمه تخت سلیمان

۴-۱۸-۲- تعیین حوضه آبخیز چشمه کارستی آلاسقل

برای تعیین محدوده احتمالی حوضه آبخیز این چشمه همانند چشمه تخت سلیمان از روش زمین‌شناسی و بیلان هیدروژئولوژیکی استفاده شده است. ابتدا با توجه به توالی چینه‌شناسی، وضعیت تکتونیک و مورفولوژی منطقه محدوده احتمالی حوضه آبخیز اولیه چشمه، تعیین شد. این چشمه در سازند آهکی جانگوتاران ظهور یافته است. این سازند در محل چشمه دارای شیب به سمت شمال می‌باشد. با توجه به توالی چینه‌شناسی محدوده احتمالی حوضه آبخیز چشمه بخشی از سازند جانگوتاران را شامل می‌شود. در مرز غرب و جنوب غربی حوضه آبخیز در تماس با سازند قم، لایه‌های ناتراوای مارنی رخنمون دارد که به عنوان یک سد هیدروژئولوژیکی مانع از حرکت آب به سمت رسوبات شده است. محدوده حوضه آبخیز حدود ۴ کیلومترمربع تعیین گردید (شکل ۴-۳۵ و ۴-۳۶). پس از بررسی‌های زمین‌شناسی برای تعیین حوضه آبخیز اولیه چشمه، به منظور تأیید یا عدم تأیید محدوده تعیین شده برای حوضه آبخیز چشمه آلاسقل، از روش بیلان هیدروژئولوژیکی استفاده شده است. برای این منظور میزان حجم تخلیه سالیانه چشمه که ۱,۲ میلیون متر مکعب می‌باشد با حجم تغذیه به دست آمده از فرمول (۴-۸) که حدوداً ۲,۴ میلیون مترمکعب می‌باشد (میزان بارندگی ۴۸۲ میلی‌متر و درصد تغذیه ۰,۳۹٪) مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به میزان خطای نسبی به دست آمده که حدوداً ۱۲ درصد است و با عنایت به اختلاف کم حجم تخلیه سالیانه چشمه و حجم تغذیه به دست آمده، حوضه آبخیز اصلاح شده حدوداً ۵,۲ کیلومتر مربع تعیین شد که با حوضه آبخیز اولیه اختلاف ناچیزی دارد.



شکل ۴-۳۵: موقعیت حوضه آبریز چشمه آلاسقل در Google earth

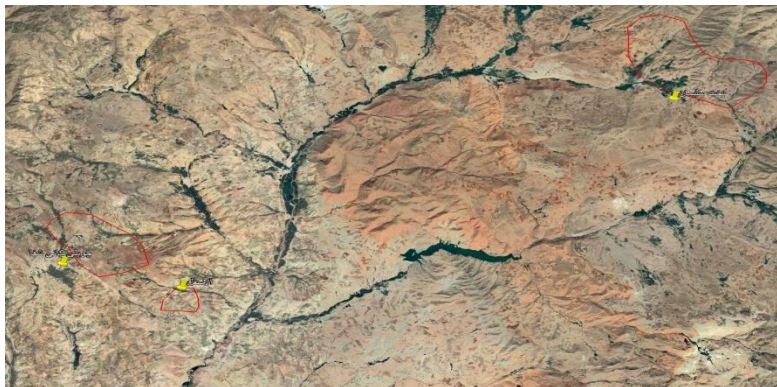


شکل ۴-۳۶: نقشه زمین‌شناسی حوضه آبگیر چشمه آلاسقل

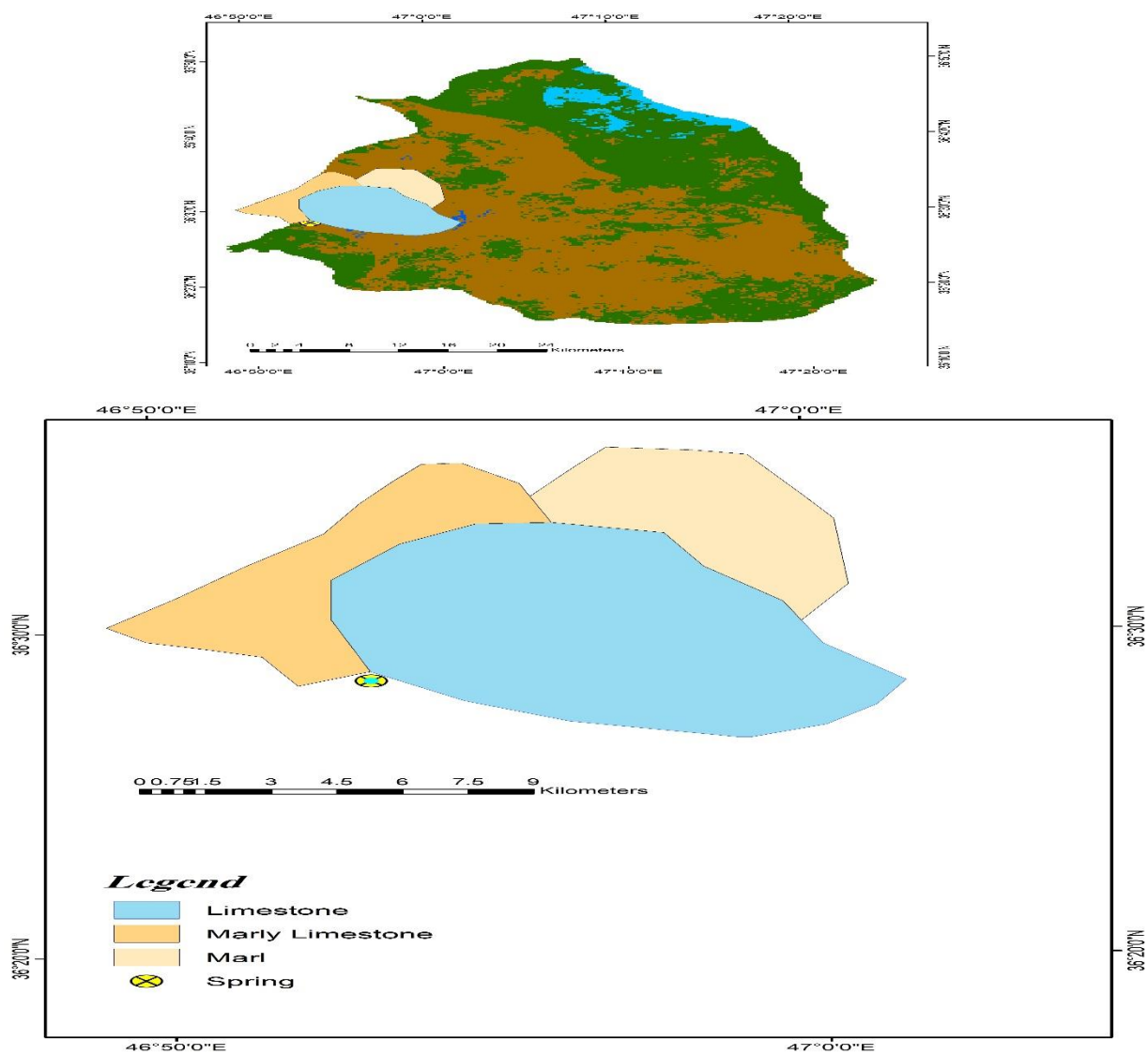
۴-۱۸-۳- تعیین حوضه آبگیر چشمه کارستی چوپلی کانی شفا

برای تعیین محدوده احتمالی حوضه آبگیر این چشمه همانند چشمه تخت سلیمان و آلاسقل از روش زمین‌شناسی و بیلان هیدروژئولوژیکی استفاده شده است. ابتدا با توجه به توالی چین‌شده‌شناسی، وضعیت تکتونیک و مورفولوژی منطقه، محدوده احتمالی حوضه آبگیر اولیه چشمه تعیین شد. این چشمه بین مرز دو سازند قم و

قرمز پایین حضور پیدا کرده است. درزه‌ها با قطع نمودن سازند قم باعث زهکشی و هدایت جریان آب زیرزمینی از ارتفاع بالاتر به ارتفاع پایین‌تر می‌شوند. بنابراین، محدوده حوضه آبرگیر چوپلی کانی شفا حدود ۱۴ کیلومتر مربع تعیین گردید (شکل ۴-۳۷ و ۴-۳۸). پس از بررسی‌های زمین‌شناسی برای تعیین حوضه آبرگیر اولیه چشمه، به منظور تایید محدوده تعیین شده برای حوضه آبرگیر چوپلی کانی شفا، از روش بیلان هیدروژئولوژیکی استفاده شده است. برای این منظور، میزان حجم تخلیه سالیانه چشمه که ۱,۸ میلیون متر مکعب می‌باشد که با حجم تغذیه بدست آمده از فرمول (۴-۸) که حدوداً ۳,۲ میلیون مترمکعب می‌باشد (با میزان بارندگی ۵۳۰ میلی‌متر و درصد تغذیه ۰,۴۱٪) مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به میزان خطای نسبی بدست آمده که حدوداً ۱۱ درصد است و با عنایت به اختلاف کم حجم تخلیه سالیانه چشمه و حجم تغذیه بدست آمده حوضه آبرگیر اصلاح شده حدود ۱۴,۶ کیلومتر مربع تعیین شد که با حوضه اولیه اختلاف ناچیزی دارد.



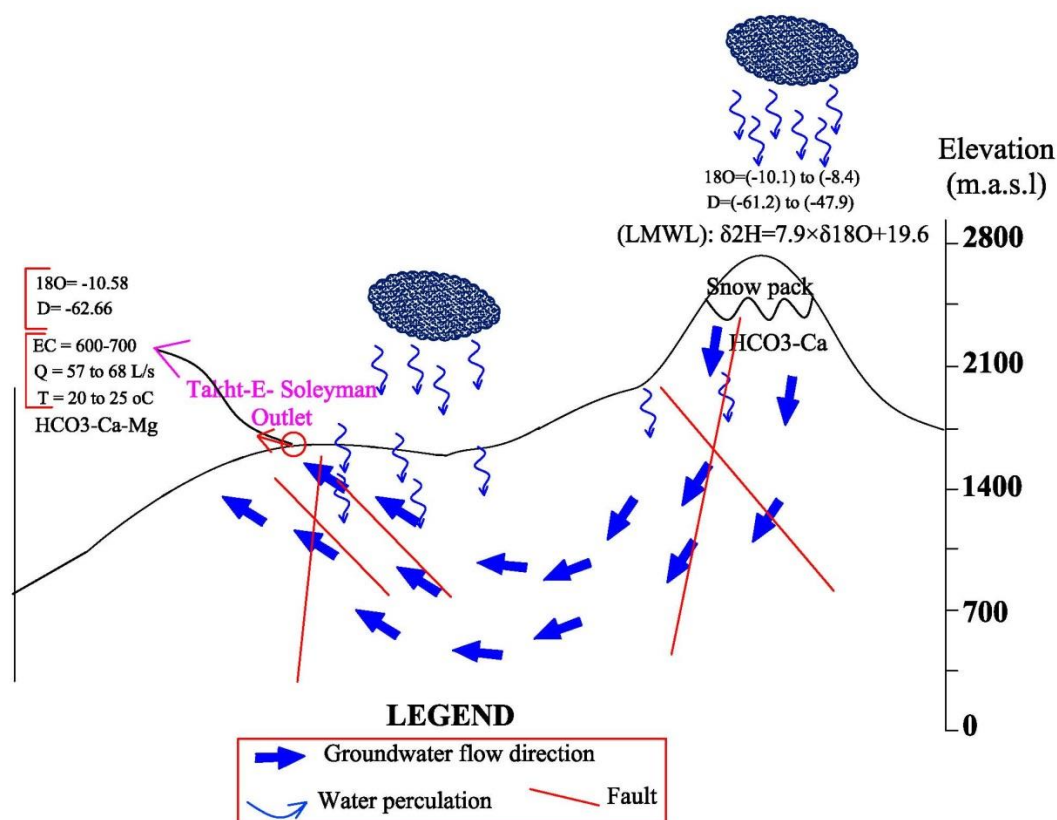
شکل ۴-۳۷: موقعیت حوضه آبرگیر چشمه چوپلی کانی شفا در Google earth



شکل ۴-۳۸: نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز چشمه چوپلی کانی شفا

۴-۱۹- مدل شماتیکی هیدروژئولوژیکی چشمه تخت سلیمان

مدل شماتیکی هیدروژئولوژیکی چشمه تخت سلیمان ترسیم شد (شکل ۴-۳۹). که براساس این مدل شماتیکی در ارتفاعات ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ متری نزولات جوی رخ داده و سپس به داخل اعماق زمین نفوذ کرده و جریان آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. این جریان آب زیرزمینی در اعماق زیاد از طریق درز و شکاف‌ها و گسل‌ها به سمت حوض تخت سلیمان جریان یافته و بصورت چشمه تخت سلیمان تخلیه می‌شود که این روند سالیان طولانی است که به این صورت اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۳۹: مدل شماتیکی هیدروژئولوژیکی چشمه تخت سلیمان

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل ابتدا نتایج بدست آمده از تحقیق به طور مختصر ذکر میشود و سپس پیشنهادهایی برای تکمیل این تحقیق ارائه خواهد شد

۵-۱- نتیجه گیری

در این بخش نتایج حاصل از کلیه مراحل تحقیق شامل ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی، تهیه لایه های اطلاعاتی برای برآورد میانگین تغذیه ی سالانه منطقه با استفاده از GIS، تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی منطقه به طور مختصر ارائه شده است.

۵-۱-۱- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی

به منظور ارزیابی جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان کارستی مورد نظر، اقدام به بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی تخت سلیمان، آلاسقل و چوپلی کانی شفا گردید. چشمه اصلی تخت سلیمان با دبی متوسط ۶۵ لیتر بر ثانیه از داخل عمارت تخت سلیمان تخلیه می گردد. در این مطالعه بحث اصلی مطالعه هیدروژئولوژی چشمه اصلی تخت سلیمان می باشد و از سایر چشمه ها فقط جهت مقایسه استفاده شده است. مقادیر دبی چشمه ها بین ۳ تا ۸۰ لیتر بر ثانیه متغیر می باشد. با توجه به ضرایب α چشمه کارستی اصلی تخت سلیمان، در ابتدا کم (ضریب α_1) و افزایش یافته (ضریب α_2)، می توان چنین استنباط کرد که کم بودن ضریب α_1 به علت کم بودن توسعه کارست در قسمت بالایی آبخوان و همچنین به علت پوشش گیاهی و یک لایه از مواد ریزدانه و تغذیه ثابت از یک منبع (مانند برف) برای یک دوره که نرخ نفوذ به آبخوان را کاهش داده است. بالا بودن ضریب α_2 را به زهکشی از درز و شکاف های بزرگتر می توان نسبت داد. با توجه به داده ها سیستم غالب جریان در این منطقه احتمالاً افشان می باشد. در سایر

چشمه ها نیز دو ضریب فرود مشاهده شده است که نشانگر تغذیه عمده از طریق ذوب برف و توسعه کم کارست در حد سیستم افشان باشد.

۵-۱-۲ - برآورد تغذیه سالانه در حوضه کارستی تخت سلیمان

به منظور برآورد تغذیه سالانه، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شده است. برای این منظور لایه‌های اطلاعاتی موثر بر تغذیه آبخوان کارستی، جهت ورود به نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. لایه‌های تهیه شده شامل عوارض کارستی مشاهده شده در منطقه، شیب توپوگرافی، جهت شیب دامنه‌ها، بارش، تراکم خطواره‌ها، لیتولوژی، تراکم آبراهه‌ها و پوشش گیاهی می‌شود. سرانجام با تحلیل‌های انجام شده، درصد تغذیه سالانه در آبخوان کارستی منطقه برآورد گردید. نتایج بدست آمده بیان گر این است که درصد تغذیه سالانه در آبخوان تخت سلیمان، آلاسقل و چوپلی کانی شفا به ترتیب برابر با ۴۴، ۴۱، ۳۹ درصد می‌باشد.

۵-۱-۳ - تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌ها

حوضه آبرگیر اولیه این چشمه‌ها ترسیم شد. سپس با بکارگیری روش بیلان هیدروژئولوژیکی دقت تعیین حوضه‌های آبرگیر چشمه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از بیلان هیدروژئولوژیکی در حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی فوق‌الذکر بیان گر این است که حوضه‌های آبرگیر اولیه این چشمه‌ها با استفاده از روش زمین‌شناسی ترسیم شده است از دقت نسبتاً بالایی برخوردار است. در نهایت، بر اساس نتایج بدست آمده از بیلان هیدروژئولوژیکی حوضه اولیه چشمه‌های کارستی مورد نظر اصلاح شده است. به این ترتیب حوضه آبرگیر چشمه‌های تخت سلیمان، آلاسقل و چوپلی کانی شفا به ترتیب برابر ۱۰،۶، ۴،۵، ۱۴،۳ کیلومتر مربع بدست آمده است.

۵-۲- نتایج حاصل از مطالعات ایزوتوپی

بررسی نتایج حاصل از بررسی‌های ایزوتوپی در منابع آب مورد مطالعه نشان داد که نمونه‌های ایزوتوپی یاد شده نزدیک به خط آب‌های جوی جهانی و بالای آن و در محدوده‌ی خط آب جوی منطقه پلات شده‌اند. این امر نشان می‌دهد که این نمونه‌ها از آب‌های جوی نشأت گرفته و بیشتر از طریق برف تغذیه می‌گردند. در این بین کم‌ترین مقدار ایزوتوپی در نمونه‌ی Sp1 بدلیل ارتفاع تغذیه‌ی بیشتر و بیش‌ترین مقدار را نمونه‌ی Sp4 داشته که دلیل آن را می‌توان به ارتفاع کمتر تغذیه و نیز اختلاط آب حاصل از ذوب برف یا بارش منطقه در تأمین آب این چشمه نسبت داد.

۵-۳- پیشنهادها

پیشنهادهای زیر جهت بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های کیفی و کمی منابع آب منطقه ارائه می‌گردد

۱- نصب باران‌سنج‌های ذخیره‌ای در حوضه آبرگیر هر سه چشمه و برآورد دقیق‌تر میانگین بارندگی در حوضه آبرگیر هر سه چشمه

۲- بستر سازی جهت نصب اشل‌های مناسب در خروجی‌های مورد نظر و تهیه دقیق‌تر هیدروگراف چشمه‌ها

۳- استفاده از ردیاب‌های رنگی برای تعیین دقیق حوضه آبرگیر و میزان توسعه‌یافتگی کارست در منطقه

- ابراهیمی ح.، کرمی غ. (۱۳۹۵) "تعیین حوضه آبریز چشمه کارستی ورسخواران، فیروزکوه". سازمان زمین‌شناسی کشور.
- ابوالفتحی خ.، علی خواه اصل م.، رضوانی م. (۱۳۹۴) "تیپ‌بندی و ارزیابی مراتع با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) مطالعه موردی: تحت واحد شهرآباد زیرحوزه آبخیز حبله رود". فصل‌نامه انسان و محیط زیست.
- ازانی س. (۱۳۹۵) "ارزیابی توسعه کارست در کوه‌های آهکی آهنگران، شمال شرق بیرجند". دانشگاه صنعتی شاهرود.
- افراسیابیان ا. (۱۳۷۷) "اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران". مجموعه مقالات دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی.
- اکبری محمودآبادی ع.، موسوی م.، علی پور ص.، افراسیابیان ا. (۱۳۷۷) "مطالعه پدیده‌های کارستیک و چشمه‌های آب شیرین آهک‌ساز در منطقه شمال تکاب". تکاب، آذربایجان غربی.
- آقاناتی ع. (۱۳۷۷) "چینه شناسی ژوراسیک ایران". انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ص ۳۵۵.
- آقاناتی ع. (۱۳۸۳) "زمین‌شناسی ایران". انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ص ۳۵۵.
- باقری ر.، رئیسی ع.، زارع م.، محمدی ض. (۱۳۸۶) "تعیین منشأ آب چشمه‌های کارستی بخش شرقی تاقدیس راوندی با استفاده از ایزوتوپ‌های اکسیژن و دتریم، هیدروشیمی و بیلان". یازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- باقری ف.، کرمی غ.، باقری ر.، نجف‌زاده ر.، رونقی ا. (۱۳۹۷) "ایزوتوپی - هیدروشیمیایی چشمه‌ی کارستی ارناره و سد مخزنی شیری‌ندره، خراسا شمالی". فصل‌نامه کوآرترنری/ایران، ص ۳۲۱-۳۳۹.
- برجی ح. (۱۳۹۴) "بررسی و مطالعه آب‌های کارست دریاچه تخت سلیمان و روان آب‌های جاری اطراف آن". دومین کنفرانس جغرافیا.
- بهرامی ش.، زنگنه اسدی م.، جهان‌فر ع. (۱۳۹۵) "ارزیابی توسعه‌ی کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در زاگرس (منطقه مورد مطالعه: تاقدیس قلاجه و توده پراو بیستون)". فصل‌نامه جغرافیا و توسعه، ص ۱۰۷-۱۲۲.

- بیرالوند م.، محجل م.، قاسمی م. (۱۳۹۵) "ترافشارش راست بر ستبرپوست در همتافت تکاب، شمال باختر ایران". سازمان زمین‌شناسی/ایران، ص ۲۷-۳۸.
- ترابی م.، کرمی غ. (۱۳۹۵) "بررسی هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی مجاور کوه دوقرال، شمال کرمانشاه". سازمان زمین‌شناسی کشور.
- توکلی س.، کرمی غ. (۱۳۹۶) "بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب مجن. شاهرود" دانشگاه صنعتی شاهرود.
- حمیدی زاده ف.، کلانتری ن.، کشاورزی م.، چرچی ع. (۱۳۹۱) "بررسی هیدروژئولوژیکی و زمین‌ساختاری چشمه دره‌اناری در منطقه کارستی شیرین بهار استان خوزستان". تحقیقات منابع آب/ایران، ص ۳۰-۴۲.
- رحیمی دهکردی ف.، کرمی غ.، فاضلی ع. (۱۳۹۲) "کاربرد GIS برای ارزیابی میزان تغذیه آهک‌های کارستی تاقدیس سالدوران و تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی سراب باباحیدر و پیرغار" پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران.
- رضائی ا. (۱۳۹۵) "بررسی میزان کارستی‌شدگی در سازند قم با استفاده از منحنی فرود چشمه‌ها، کوه قیدار" سازمان زمین‌شناسی کشور.
- رضائی ز.، مؤید م.، جهانگیری ا. (۱۳۹۰) "بررسی پتروگرافی و پترولوژی توده نفوذی شمال تخت سلیمان" آذربایجان غربی.
- رهبری ه.، رشیدنژاد عمران ن.، خلعت‌بری جعفری م. (۱۳۹۶) "ژئوشیمی، خاستگاه ژئودینامیکی و منشأ احتمالی ارتوگنیس‌های کوهستان بلقیس، شمال باختری ایران" سازمان زمین‌شناسی ایران، ص ۷۷-۸۸.
- ریاحی پور م.، کلانتری ن. (۱۳۸۷) "تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی پیرغار به روش زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی" مجموعه مقالات دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- شبان م. (۱۳۹۰) "تعیین حوضه آبریز و منابع تأمین آب چشمه سبزآب (شمال شرق مسجد سلیمان)" مسجد سلیمان: دانشگاه شهید چمران اهواز.

- شمسی ع،، کرمی غ،، طاهری ع،، هونکلر د. (۱۳۹۵) "بررسی ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و دوتریوم در بارش‌ها و تعیین خط آب جوی حوضه هراز" سازمان زمین‌شناسی کشور.
- شمسی ع،، کرمی غ،، طاهری ع،، هونکلر د. (۱۳۹۵) "کاربرد سنجش از دور در پایش تغییرات ذوب برف و اثر آن بر چشمه‌های کارستی منطقه لاسم (حوضه هراز)" سازمان زمین‌شناسی کشور.
- صالحی ح،، حقی زاده ع. (۱۳۹۴) "ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تلفیق مدل AqQA و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت کامیاران)" نشریه مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی.
- ضیاء ح،، کرمی غ،، طاهری ع. (۱۳۹۵) "بررسی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی کوه‌های شتری، با استفاده از نسبت های یونی و ترکیب ایزوتوپی" انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- عزیززاده ا. (۱۳۸۹) "اصول هیدرولوژی کاربردی" انتشارات آستان قدس رضوی.
- فرهادی ص،، علیجانی ف،، ناصری ح. (۱۳۹۹) "مقایسه مشخصات ایزوتوپ‌های پایدار بارش سیل آسا فروردین ۱۳۹۸ در جنوب غرب کشور با خط آب جوی دیگر مناطق ایران و کشورهای مجاور" نشریه هواشناسی کشاورزی وابسته به انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران، ص ۴۴-۵۹.
- قدری م،، رضائی مقدم م. (۱۳۸۵) "کارن‌ها، متنوع‌ترین پدیده‌های کارستی در منطقه تخت سلیمان" فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، ص ۱۳۰۳۶-۱۳۰۵۱.
- قدیمی م،، احمدی ح،، مقیمی ا،، جعفری‌گلو م. (۱۳۹۳) "بررسی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی اشترانکوه در ارتباط با سازندهای زمین‌شناسی منطقه" مجله منابع طبیعی ایران، ص ۲۶۳-۲۷۸.
- قریب ف،، لاسمی ی،، امامی م. (۱۳۸۹) "سنگ‌شناسی و محیط رسوبی سازند کهر در نواحی فیروزآباد و شاهین‌دژ (البرز مرکزی و باختری)" سازمان زمین‌شناسی کشور، ص ۱۰۹-۱۱۴.
- کدخدائی ف،، واعظی ع،، بیرامیان ا. (۱۳۹۵) "گسترش واحدهای کارستی و توسعه‌ی کارست در استان آذربایجان غربی" سازمان زمین‌شناسی کشور.
- کریمی ح،، ناصری ح،، علیجانی ف. (۱۳۹۵) "بررسی تبادل هیدرولیکی بین آبخوان‌های کارستی و آبرفتی دشت حسن‌آباد-کرمانشاه با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم" کرمانشاه.

- مالی س.، محمدی ض. (۱۳۹۲) "بررسی توسعه‌ی کارست با استفاده از تحلیل هیدروگراف و ارتباط سری زمانی بارندگی و دبی چشمه‌ها" *انجمن زمین‌شناسی ایران*.
- محمدزاده ج.، ابراهیم پور ص. (۱۳۹۱) "کاربرد ایزوتوپ پایدار و هیدروژئوشیمی به منظور بررسی منشأ و تغییرات کیفی منابع آب حوضه‌ی آبریز دریاچه زریوار" *نشریه آب و خاک*، ص ۱۰۱۸-۱۰۳۱.
- محمدزاده ج.، اسکندری ع. (۱۳۹۷) "استفاده از تکنیک‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی به منظور فهم بهتر ویژگی‌های منابع آبی مهم محدوده‌های پاوله و جوانرود (استان کرمانشاه)" *مجله هیدروژئولوژی تبریز*، ص ۸۰-۹۸.
- محمدزاده ج.، امیری ح. (۱۳۹۸) "بررسی زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) محدوده پل ذهاب با توجه به تغییرات زمانی و مکانی ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}O$ و δ^2H)" *تحقیقات منابع آب ایران*، ص ۳۲۷-۳۴۰.
- مقصودی م.، صفری ف.، چهارراهی ذ. (۱۳۸۸) "بررسی توسعه کارست در توده پراو - بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی" *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ص ۵۱-۶۵.
- مهدوی پور م.، خوش‌رفتار ر.، قدری م.، فیض الله پور م. (۱۳۹۳) "بررسی لندفرم‌های کارست منطقه تخت سلیمان تکاب" *تکاب*.
- میرحسینی ق.، باقری ر.، نیک قوجق ی. (۱۳۹۵) "تحلیل می‌حیی فرود و تعیین حوضه آبگیر چشمه کارستی زاو در منطقه کلالة، استان گلستان" *سازمان زمین‌شناسی کشور*.
- میرحسینی ق.، باقری ر.، نیک قوجق ی. (۱۳۹۶) "مطالعه هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی منطقه کلالة، استان گلستان" *گلستان*.
- میرحسینی ق.، باقری ر.، نیک قوجق ی. (۱۳۹۷) "هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی منطقه کلالة، استان گلستان" *اکوهیدرولوژی*، ص ۳۸۷-۳۹۷.
- میرزایی ج.، خاکزاد ا.، رسا ا. (۱۳۷۷) "بررسی زمین‌شناسی اقتصادی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰ تکاب" *تکاب، آذربایجان غربی*.

- نصرتی آ.، باقری ر. (۱۳۹۵) "بررسی خصوصیات هیدروژنولوژیکی و هیدروژنوشیمیایی سفره آب زیرزمینی دشت بسطام" بسطام شاهرود.
- ودیعتی م.، خدری ا.، مصلح ا. (۱۳۹۴) "ارزیابی هیدروژنولوژیکی چشمه کارستی پیرغار براساس تحلیل هیدروگراف چشمه" کنفرانس بین‌المللی توسعه با محوریت کشاورزی، محیط زیست و گردشگری.

- Ford, D. C., & Williams, P. W. (2007). "Karst Hydrogeology and Geomorphology", *John Wiley and Sons*, pp. 562.
- A review of research dealing with isotope hydrology in Iran and the first Iranian meteoric water line. (2014). *JGeope*, pp. 73-86.
- Ashgari, J. (2007). *In Influences of anticlinal structure on regional flow, zagros, iran*. zagros, iran: University of Shiraz.
- Ashjari, J., & Raeisi, E. (2006). "Litological Control on Water chemistry in Karst Aquifers of The Zagros Range, Iran". *Cave and karst Science*, pp. 111-118.
- Bogli, A. (1980). "Karst Hydrology and Physical Speleology". *Springer-Verlag, Berlin*, pp. 284.
- Bögli, A. (1980). "Karst Hydrology and Physical Speleology". *Springer Verlag*, pp. 285.
- Bonacci, O. (1993). "Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers". *Hydrological Sciences Journal–Journal Des Sciences Hydrologiques*, pp. 51-62.
- Bonacci, O., & Magdenic, A. (1993). "The Catchment Area Of The Spring Sv.Ivan Karst". *Ground Water*.
- Chow, V. T. (1988). *Applied Hydrology*. *McGraw-Hill*, pp. 572.
- Fiorillo, F. (2014). "The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers". *Water Resources Management*, pp. 1781-1805.
- Ford, D., & Williams, P. (1989). "Karst geomorphology and hydrology". *Chapman and Hall*, pp. 601.

- Goldscheider, N., & Drew, D. (2007). Methods in karst Hydrogeology. *Taylor and Francis*, pp. 264-273.
- Grasso, D., Jeannin, D., & Zwahlen, F. (2003). A deterministic Approach to the coupled analysis of karst springs hydrographs and chemographs. *Journal of Hydrology*, 65-76.
- Hounslow, A. (1995). Water quality data: analysis and interpretation. *CRC press*.
- Jahanshahi, R., & Zare, M. (2016). Delineating the Origin of Groundwater in the Golgohar Mine Area of Iran Using Stable Isotopes of and Hydrochemistry. *Mine Water Environ.*
- Jeevanandam, M., Kannan, R., Srinivasalu, S., & Rammohan, V. (2007). Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of lower part of the Ponnaiyar River Basin, Cuddalore district, South India. *Environmental monitoring and assessment*, 263-274.
- Karami, G. (2002). *Assessment Of Heterogeneity And Flow System In Karstic Aquifers Using Pumping Test Data*. Newcastle: School Of Civil Engineering And Geosciences University Of Newcastle Upon Type.
- Kresic, N. (2013). Water in Karst: Management, Vulnerability and Restoration. *McGraw-Hill*, pp. 736.
- Langmuir, D. (1997). Aqueous environmental geochemistry. *Prentic hall*.
- Milanovic, P. (1981). Karst Hydrogeology. *Water Resources Pubns*, p.434.
- Raeisi, E. (2002). Carbonate Karst Caves In Iran. In: Kranjc A (Ed) Evolution Of Karst. *Ljubljana-Postojna*, 339-344.

- Raeisi, E., & Karami, G. (1997). Evaluation Of Moisture Factors Of The Physic-Chemical Characteristics Of Sheshpir Karst Spring. *Carbonates And Evaporates*, pp. 162-169.
- Raju, N. J., Shukla, U. K., & Ram, p. (2011). Hydrogeochemistry for the assessment of groundwater quality in Varanasi: a fast-urbanizing center in Uttar Pradesh, India. *Environmental monitoring and assessment*, 279-300.
- 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*.
- Todd, D. K. (2005). Groundwater hydrology. *Wiley*, p. 315.
- White, W. D. (1988). Geomorphology and hydrology of karst Terrains. *Oxford University Press*, pp. 464.
- WHO. (2011). Guidelines for drinking water quality. *3rd Edn, Geneva*.

Abstract

Takht-e-Soleyman region is located in the southeast of West Azerbaijan province. The presence of karst limestones and the relatively high average annual rainfall in the region has led to the formation of karst springs such as Takht-e-Soleyman, Chartagh, Alasqal and Chopli Kani Shafa in the region. The main purpose of this research was to study the karst hydrogeological of Takht-e-Soleyman spring using geological, hydrogeological, hydrochemical and isotopic methods. The pH, EC, main ion concentrations, isotopic values of the springs and the rainfall and also flow rates of the springs has been measured. The equation of $\delta^2\text{H} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 19.6$ was obtained for the isotopic meteoric water line of the Takht-e-Soleyman region, which has lower slope and intercept than the Global and Mediterranean water lines due to secondary evaporation. The relationship between altitude and the amount of oxygen 18 in this region is estimated as $\text{Elevation (m)} = -223.5 \delta^{18}\text{O} + 40.2$. The flow regime in the all springs is mostly diffuse flow. Also, the results of recession curve showed that Takht-e-Soleyman spring with two different recessions, mainly recharge through snowmelt to a karstic aquifer. The results of isotopic study showed that the spring water originates from atmospheric precipitation. The predominant water type of the springs is $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$. All springs are saturated to super saturated with respect to calcite and dolomite, but under saturated with respect to gypsum and halite. The average annual recharge for Takht-e Soleiman, Chopli Kani Shafa and Alasqal catchments was 44%, 41% and 39%, respectively. Takht-e Soleyman catchment area was determined using the results obtained and the inquiry of various karst features.

Keywords: Recession curve, Karst development, Reservoir, Hydrogeochemical, Isotopic, GIS, West Azarbaijan



Shahrood University of Technology

Faculty of Earth Sciences

Hydrogeology and Environmental Geology Group

M.Sc. Thesis

Karst hydrogeology and origin of the Takht-e Soleyman Spring, Takab

By:

Ali Abbaspour

Supervisor:

Rahim Bagheri

June 2021