

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین
پایان نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی

بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی

چشمه‌های کارستی غرب مجن

نگارنده: سیما توکلی

استاد راهنما:

دکتر غلامحسین گرمی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۱۲۸۴۸
تاریخ: ۱۹/۱۱/۲۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم سیما توکلی با شماره دانشجویی ۹۴۰۴۷۶۴ رشته زمین شناسی گرایش آبشناسی تحت عنوان بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی غرب مجن که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

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

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر غلامحسین کرمی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر پرویز امیدی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر هادی جعفری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر رحیم باقری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: رشته پرویز امید
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۱۳۹۶/۱۱/۲۳



تقدیم به دو گوهر فروزان زندگیم:

پدر بزرگوارم و مادر مهربانم

آنان که دریای بیکران مهر خود را بر من ارزانی داشتند، امید آن که قطره‌ای از دریای محبتشان

را پاسخگو باشم.

و همچنین خواهران عزیزم، همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگیم.

تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را سزااست که بر بنده منت نهاد، هستی‌ام بخشید و توفیق‌ام داد تا در مسیر کسب علم و تجربه قرار گیرم. اکنون که به فضل خداوند در این موقعیت قرار گرفته‌ام بر خود لازم می‌دانم از کلیه عزیزانی که از راهنمایی‌ها، مشورت‌ها و مساعدت‌هایشان در انجام این تحقیق بهره برده‌ام، قدردانی نمایم.

در ابتدا از خانواده عزیزم که در طول دوران تحصیل همواره یار و یاور من بوده‌اند از صمیم قلب سپاسگزارم و سلامتی ایشان را از درگاه خداوند متعال خواهانم. از جناب دکتر کرمی، استاد راهنمای فرهیخته و بزرگوارم که اولین روشنی‌بخش و راهنمای این راه بودند و بدون رهنمودهای ارزنده ایشان، به پایان رساندن این تحقیق ممکن نبود، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. از زحمات تمامی اساتید ارجمند و دلسوز گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم زمین به ویژه جناب دکتر جعفری و دکتر باقری که افتخار شاگردی ایشان را داشتم، تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین از کارمندان محترم دانشکده علوم زمین به ویژه خانم فارسی، ریاست و پرسنل امور آب منطقه‌ای و هواشناسی شهرستان شاهرود که در طی اجرای این تحقیق، همکاری صمیمانه‌ای با من داشتند تشکر می‌نمایم. در خاتمه از تمامی همکلاسی‌ها و دوستانم به ویژه خانم‌ها طالبی‌زاده، عرب‌زاده، شیدایی، جهانشاهی و خانلری، همچنین دانشجویان دکتری آب‌شناسی آقای شمسی، خانم‌ها باقری و بوسلیک که مرا در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند، کمال تشکر را دارم. با پوزش از تمام کسانی که مجال ذکر نام آن‌ها نشد.

((مهربانی‌هایتان برایم فراموش نشدنی خواهد بود))

سیما توکلی (بهمن ۱۳۹۶)

تعهد نامه

اینجانب سیما توکلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته آب‌شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی خصوصیات هیدروژنولوژیکی و هیدروژنوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب مجن تحت راهنمایی دکتر غلامحسین کرمی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 بوده‌اند 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 حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، 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 مورد مطالعه در هشت کیلومتری غرب مجن در جنوب آبشار مجن، از توابع شهرستان شاهرود واقع شده است. جهت بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها، دبی، هدایت الکتریکی و دما از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. به دلیل تغییرات ناچیز هدایت الکتریکی، غلظت یون‌ها طی دو دوره (خرداد ماه و مهر ماه ۱۳۹۶) مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده نشان دادند که ضریب تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها نسبتاً اندک می‌باشند. اندک بودن ضریب تغییرات آبدهی، هدایت الکتریکی و دمای آب تأییدکننده رژیم غالب سیستم جریان افشان در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. علاوه بر تغییرات زمانی اندک پارامترهای مذکور، عدم وجود عوارض مورفولوژیکی معرف توسعه‌یافتگی کارست همچون گودی‌های مسدود، فروچاله‌ها و پلیه‌ها نیز تأییدکننده سیستم غالب جریان افشان در منطقه می‌باشد. منحنی فرود چشمه‌های مورد مطالعه دارای یک ضریب بده (α) با شیب $0/009$ می‌باشد که بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان کارستی مورد نظر است. یکی از دلایل اصلی ظهور چشمه‌های منطقه مورد مطالعه، برخورد آب زیرزمینی حوضه کارستی این چشمه‌ها (سنگ‌های آهکی سازندهای کرتاسه بالایی و لار) با واحدهای غیرقابل نفوذ (مارن‌ها و آهک‌های مارنی) می‌باشد. بر این اساس چشمه‌های منطقه از نوع چشمه‌های سرریزی (Overflow Springs) می‌باشند. همچنین در این تحقیق حوضه آبگیر چشمه‌ها به صورت مقدماتی ترسیم گردید. سپس با استفاده از روش بیلان و مقایسه مقادیر حجم تخلیه و تغذیه سالانه از حوضه آبگیر، دقت حوضه آبگیر مقدماتی ترسیم شده، مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس مقایسه‌ی مذکور، خطای نسبی $0/8$ درصد بدست آمد که با توجه به خطای نسبی اندک بین حجم‌های تغذیه و تخلیه و همچنین نحوه قرار گرفتن واحدهای سنگی مختلف در منطقه، حوضه آبگیر ترسیم شده از دقت مناسبی برخوردار است.

کلمات کلیدی: هیدروژئولوژیکی، هیدروژئوشیمیایی، چشمه‌های کارستی مجن

مقالات مستخرج از این پایان نامه:

توکلی، س.، کرمی، غ.، (۱۳۹۶)، تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی غرب مجن، شاهرود، پنجمین کنگره سالانه بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول: مقدمه
۱.....	۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق
۲.....	۲-۱- موقعیت جغرافیایی
۲.....	۳-۱- آب و هوای منطقه مورد مطالعه
۵.....	۴-۱- زمین‌شناسی منطقه
۶.....	۱-۴-۱- چینه‌شناسی
۱۰.....	۲-۴-۱- زمین‌شناسی ساختاری منطقه
۱۱.....	۵-۱- ژئومورفولوژی منطقه
۱۳.....	۶-۱- هیدرولوژی منطقه
۱۳.....	۷-۱- هیدروژئولوژی منطقه
	فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین درباره‌ی بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و
۱۵.....	هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی
۱۵.....	۱-۲- تعریف کارست
۱۶.....	۲-۲- چشمه‌های کارستی
۱۷.....	۳-۲- طبقه‌بندی چشمه‌های کارستی
۱۸.....	۱-۳-۲- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس اختصاصات هیدرولوژیکی
۱۸.....	۲-۳-۲- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس هیدروگراف جریان خروجی
۱۸.....	۳-۳-۲- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس شرایط زمین‌شناسی و ساختاری
۱۹.....	۴-۳-۲- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس منشأ آب
۱۹.....	۴-۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی

- ۲۱-۴-۲- تغییرات آبدهی
- ۲۳-۴-۲- تغییرات دمای آب
- ۲۵-۴-۲- تغییرات هدایت الکتریکی
- ۲۷-۴-۲- تغییرات غلظت یونی
- ۲۸-۵-۲- ارتباط تکنیک با کارست
- ۳۰-۶-۲- تغذیه در کارست
- ۳۲-۷-۲- حوضه آبگیر در چشمه‌های کارستی
- ۳۳-۸-۲- هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی
- ۳۵-۸-۲- تحلیل منحنی فرود چشمه‌های کارستی
- ۳۷- فصل سوم: مواد و روش‌ها**
- ۳۷-۱-۳- جمع‌آوری آمار و اطلاعات
- ۳۸-۲-۳- بازدیدهای صحرایی و زمین‌شناسی
- ۳۸-۳-۳- نمونه‌برداری از چشمه‌ها
- ۳۹-۴-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه‌ها
- ۴۰-۱-۴-۳- اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها
- ۴۰-۲-۴-۳- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی
- ۴۱-۳-۴-۳- اندازه‌گیری درجه حرارت
- ۴۱-۴-۴-۳- اندازه‌گیری اسیدیتته
- ۴۱-۵-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه
- ۴۲-۱-۵-۳- اندازه‌گیری آنیون‌ها
- ۴۲-۲-۵-۳- اندازه‌گیری کاتیون‌ها
- ۴۲-۳-۵-۳- درصد خطای آزمایش
- ۴۳-۴-۵-۳- نسبت جذب سدیم

- ۴۳.....۵-۵-۳ درصد سدیم
- ۴۳.....۶-۵-۳ سختی کل
- ۴۴.....۷-۵-۳ قلیائیت کل
- ۴۴.....۸-۵-۳ محاسبه ضرایب اشباع
- ۴۴.....۹-۵-۳ ترسیم نمودارهای هیدروشیمیایی
- ۴۵.....۶-۳ تعیین محدوده حوضه آبخیز چشمه‌های غرب مجن
- ۴۵.....۱-۶-۳ تعیین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبخیز منطقه مورد مطالعه

فصل چهارم: بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب

- ۴۷..... مجن
- ۴۷.....۱-۴ ارزیابی توسعه کارست براساس خصوصیات ژئومورفولوژیکی
- ۴۸.....۱-۱-۴ چشمه‌های کارستی
- ۵۲.....۲-۱-۴ سنگ‌های برهنه
- ۵۲.....۲-۴ بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها
- ۵۴.....۱-۲-۴ تغییرات زمانی دبی چشمه‌ها
- ۵۷.....۲-۲-۴ ارزیابی و تحلیل ضریب منحنی فرود
- ۵۹.....۳-۲-۴ تغییرات زمانی درجه حرارت آب
- ۶۰.....۳-۴ بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها
- ۶۰.....۱-۳-۴ تغییرات زمانی هدایت الکتریکی
- ۶۲.....۲-۳-۴ غلظت یون‌های اصلی
- ۶۳.....۴-۴ بررسی مقادیر پارامترهای محاسبه شده
- ۶۴.....۱-۴-۴ نسبت کلسیم به منیزیم
- ۶۴.....۲-۴-۴ قلیائیت
- ۶۴.....۳-۴-۴ سختی کل

- ۴-۴-۴- درصد سدیم و نسبت جذب سدیم..... ۶۵
- ۴-۴-۵- محاسبه شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت..... ۶۶
- ۴-۵-۵- نمودارهای هیدروشیمیایی ۶۷
- ۴-۵-۱- نمودار پایپر ۶۷
- ۴-۵-۲- نمودار استیف ۶۸
- ۴-۵-۳- نمودار شولر ۷۰
- ۴-۶-۶- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی مچن ۷۱
- ۴-۶-۱- ترسیم مقدماتی حوضه آبرگیر ۷۱
- ۴-۶-۲- صحت‌سنجی حوضه آبرگیر مقدماتی با استفاده از روش بیلان ۷۳
- ۴-۶-۳- تعیین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبرگیر مورد مطالعه ۷۹
- ۴-۶-۱-۳- مرز حوضه ۷۹
- ۴-۶-۲-۳- مساحت و محیط حوضه ۸۱
- ۴-۶-۳-۳- شکل حوضه ۸۱
- ۴-۶-۳-۴- ضریب انشعابات آبراهه‌ای ۸۲
- ۴-۶-۳-۵- نیمرخ طولی آبراهه اصلی ۸۳
- ۴-۶-۳-۶- شیب آبراهه ۸۴
- ۴-۶-۳-۷- شیب متوسط حوضه ۸۵
- ۴-۶-۳-۸- محاسبه زمان تمرکز حوضه مورد مطالعه ۸۵
- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۷**
- ۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۷
- ۵-۲- پیشنهادها ۹۰
- منابع مورد استفاده ۹۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی ۲
- شکل ۱-۲- نمودار امپروترمیک منطقه مجن برای دوره آماری ۱۵ ساله ۵
- شکل ۱-۳- نقشه زمین‌شناسی مجن ۶
- شکل ۱-۴- نمایی از تناوب‌های سنگ آهک خاکستری روشن با مارن‌های سبز روشن ۹
- شکل ۱-۵- نمایی از ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه ۱۲
- شکل ۱-۶- تصویر برجسته از توپوگرافی منطقه ۱۲
- شکل ۳-۱- محل نمونه‌برداری از چشمه‌ها ۳۹
- شکل ۴-۱- موقعیت ساختاری چشمه‌های غرب مجن ۴۹
- شکل ۴-۲- نمایی از چشمه‌های غرب مجن ۴۹
- شکل ۴-۳- موقعیت چشمه‌های کارستی غرب مجن ۵۱
- شکل ۴-۴- نمایی از سنگ‌های برهنه ۵۲
- شکل ۴-۵- هیدروگراف چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ ۵۴
- شکل ۴-۶- تغییرات زمانی دبی و بارش چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ ۵۷
- شکل ۴-۷- منحنی فرود چشمه‌های غرب مجن از مهرماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ ۵۸
- شکل ۴-۸- تغییرات زمانی دبی و دما چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ ۶۰
- شکل ۴-۹- تغییرات زمانی دبی و هدایت الکتریکی چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ ۶۲
- شکل ۴-۱۰- نمودار پایپر چشمه‌های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶ ۶۸
- شکل ۴-۱۱- نمودار استیف چشمه‌های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶ ۶۹
- شکل ۴-۱۲- نمودار شولر چشمه‌های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶ ۷۰
- شکل ۴-۱۳- نقشه حوضه آبخیز مقدماتی چشمه‌های غرب مجن ۷۲

- شکل ۴-۱۴- منحنی هیپسومترى حوضه آبگیر چشمه‌های غرب مجن ۷۵
- شکل ۴-۱۵- نمودار ارتفاع- بارش ایستگاه‌های مجاور حوضه آبگیر چشمه‌های غرب مجن ۷۶
- شکل ۴-۱۶- مرز حوضه آبگیر چشمه‌های غرب مجن ۸۰
- شکل ۴-۱۷- انشعابات آبراه‌های حوضه آبگیر چشمه‌های غرب مجن ۸۳
- شکل ۴-۱۸- نیمرخ طولی آبراهه اصلی حوضه آبگیر چشمه‌های غرب مجن ۸۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- میانگین بارندگی و دما در یک دوره ۱۵ ساله در منطقه مورد مطالعه ۳
- جدول ۲-۱- رده‌بندی اقلیمی دمارتن ۴
- جدول ۱-۴- موقعیت جغرافیایی و ارتفاع چشمه‌های منطقه مورد مطالعه ۵۰
- جدول ۲-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل نمونه‌برداری چشمه‌های غرب مجن ۵۳
- جدول ۳-۴- داده‌های دبی و بارش منطقه مورد مطالعه ۵۶
- جدول ۴-۴- غلظت یون‌های اصلی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ۶۳
- جدول ۵-۴- پارامترهای محاسبه شده ۶۳
- جدول ۶-۴- طبقه‌بندی آب‌ها براساس سختی کل ۶۵
- جدول ۷-۴- میانگین شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت برای چشمه‌های مورد مطالعه ۶۶
- جدول ۸-۴- داده‌های هیپسومتری گروه‌های ارتفاعی حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن ۷۴
- جدول ۹-۴- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی اطراف حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن ۷۶
- جدول ۱۰-۴- جدول برآورد درصد تغذیه سالانه در کارست ۷۷

فصل اول: مقدمه

۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

آب به عنوان یک منبع قابل تجدید، نقش مهمی در توسعه‌ی مناطق شهری و روستایی دارد. رشد سریع جمعیت، توسعه مناطق شهری و کشاورزی، محدودیت منابع آب سطحی و اقلیم خشک ایران نیاز روزافزون به منابع آبی جدید را ایجاد و اهمیت مطالعه آبخوان‌های کارستی را دو چندان کرده است. اهمیت سفره‌های کارستی از آنجا مشخص می‌شود که حدود ۲۵ درصد از آب شرب جمعیت جهان را فراهم می‌کنند (Ford and Williams 2007). از طرف دیگر منابع آب موجود در سنگ‌های آهکی کارستی دارای کیفیت بسیار مطلوب بوده و یکی از بهترین و سالم‌ترین منابع آب شرب می‌باشند. علاوه بر این‌ها بررسی‌های هیدروژئولوژی نشان می‌دهد که آبدهی چشمه‌های کارستی تابع عواملی مانند بارش و شدت آن، وسعت و نوع سازند کارستی، حوضه آبرگیر چشمه و درجه‌ی توسعه کارست در منطقه می‌باشند. در غرب منطقه مجن، رخنمون‌های گسترده‌ای از سازندهای آهکی وجود دارد که آبخوان‌های کارستی در آن‌ها تشکیل شده‌اند. از آبخوان‌های کارستی مذکور تعدادی چشمه بزرگ و کوچک کارستی خارج می‌شود که تاکنون هیچگونه مطالعه‌ای بر روی آن‌ها انجام نشده است. بنابراین، هدف اساسی از انجام این تحقیق بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب مجن می‌باشد. در این مطالعه همچنین سعی می‌شود به بررسی تغییرپذیری دبی و هدایت الکتریکی (EC) در چشمه‌های کارستی موجود در منطقه، سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی تأمین‌کننده آب چشمه‌ها و توسعه کارست در غرب مجن پرداخته شود.

۱-۲- موقعیت جغرافیایی

منطقه مورد مطالعه در هشت کیلومتری غرب شهر مجن در جنوب آبشار مجن، از توابع شهرستان شاهرود واقع شده است. محدوده‌ی مورد مطالعه، چشمه‌های کارستی و حوضه آبخیز آن‌ها می‌باشد که مختصات جغرافیایی آن $54^{\circ}31'40''$ تا $54^{\circ}34'15''$ طول شرقی و $36^{\circ}26'50''$ تا $36^{\circ}28'20''$ عرض شمالی است. شکل (۱-۱) راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه از طریق جاده آسفالت‌شاهرود-بسطام-مجن می‌باشد.



شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی (برگرفته از نقشه راه‌های ایران)

۱-۳- آب و هوای منطقه مورد مطالعه

بسیاری از مؤلفه‌های هیدرولوژیک هر منطقه‌ای از وضعیت اقلیمی ناشی می‌شوند. با استفاده از آمار ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی موجود در منطقه، وضعیت آب و هوا و اقلیم منطقه مورد بررسی قرار

گرفت. متوسط درجه حرارت و بارندگی ماهانه در یک دوره ۱۵ ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۱) در جدول (۱-۱) نشان داده شده است. براساس دوره آماری ۱۵ ساله، متوسط درجه حرارت سالانه ۱۰/۱ درجه سانتی‌گراد و بیشینه دما در مرداد ماه و کمینه دما در دی ماه می‌باشد. همچنین متوسط بارندگی سالانه ۳۱۶/۶ میلی‌متر و بیشترین و کمترین مقدار بارندگی به ترتیب در فروردین و مرداد ماه می‌باشد.

جدول ۱-۱- میانگین بارندگی و دما در یک دوره ۱۵ ساله در منطقه مورد مطالعه

ماه / مشخصه آماری	متوسط بارندگی (میلی‌متر)	متوسط درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)
مهر	۹/۸	۱۳/۹
آبان	۲۵/۵	۶/۹
آذر	۲۴/۹	۱/۳
دی	۱۶/۸	-۲/۱
بهمن	۴۲/۱	-۱/۴
اسفند	۴۰/۳	۲/۷
فروردین	۵۹/۷	۷/۷
اردیبهشت	۴۱/۳	۱۳/۳
خرداد	۲۱/۹	۱۷/۸
تیر	۱۱/۳	۲۱/۵
مرداد	۷/۷	۲۱/۶
شهریور	۱۵/۱	۱۸/۵
میانگین سالانه	۳۱۶/۶	۱۰/۱

جهت تعیین اقلیم منطقه از ضریب دمارتن و نمودار امبروترمیک استفاده شده است که نتایج آن در زیر ارائه شده است. برای تعیین اقلیم منطقه، دمارتن با توجه به میانگین دما و بارش سالانه معادله (۱-۱) را پیشنهاد کرده است:

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

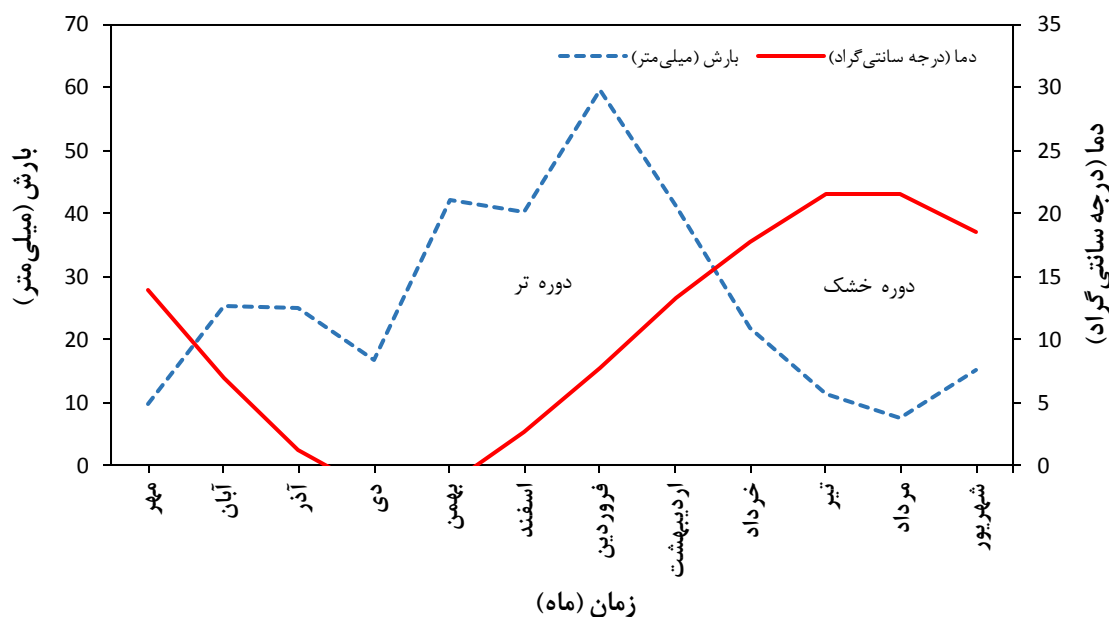
در این معادله I شاخص دمارتن، P میانگین بارش سالانه بر حسب میلی‌متر و T متوسط درجه حرارت سالانه بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد (علیزاده ۱۳۸۰). با توجه به مقادیر برآورد شده متوسط بارندگی سالانه و متوسط درجه حرارت سالانه برای منطقه مورد مطالعه، مقدار شاخص دمارتن ۱۵/۷ بوده و اقلیم منطقه از نوع نیمه‌خشک می‌باشد.

جدول ۱-۲- رده‌بندی اقلیمی دمارتن (علیزاده ۱۳۸۰)

نام اقلیم	محدوده ضریب خشکی دمارتن
خشک	کوچکتر از ۱۰
نیمه‌خشک	۱۰ - ۱۹/۹
مدیترانه‌ای	۲۰ - ۲۳/۹
نیمه‌مرطوب	۲۴ - ۲۷/۹
مرطوب	۲۸ - ۳۴/۹
بسیار مرطوب	بزرگتر از ۳۵

نمودار امبروترمیک منطقه براساس تغییرات میانگین ماهانه دمای هوا و بارندگی ترسیم و در شکل (۲-۱) ارائه شده است. با توجه به نمودار مذکور، در زمان‌هایی که میانگین بارندگی بالاتر از میانگین دما است، فصل

تر و در غیر این صورت فصل خشک اتفاق می‌افتد. بر طبق این نمودار، فصل تر منطقه تقریباً از آبان ماه تا اردیبهشت ماه بوده و بقیه سال، فصل خشک می‌باشد.



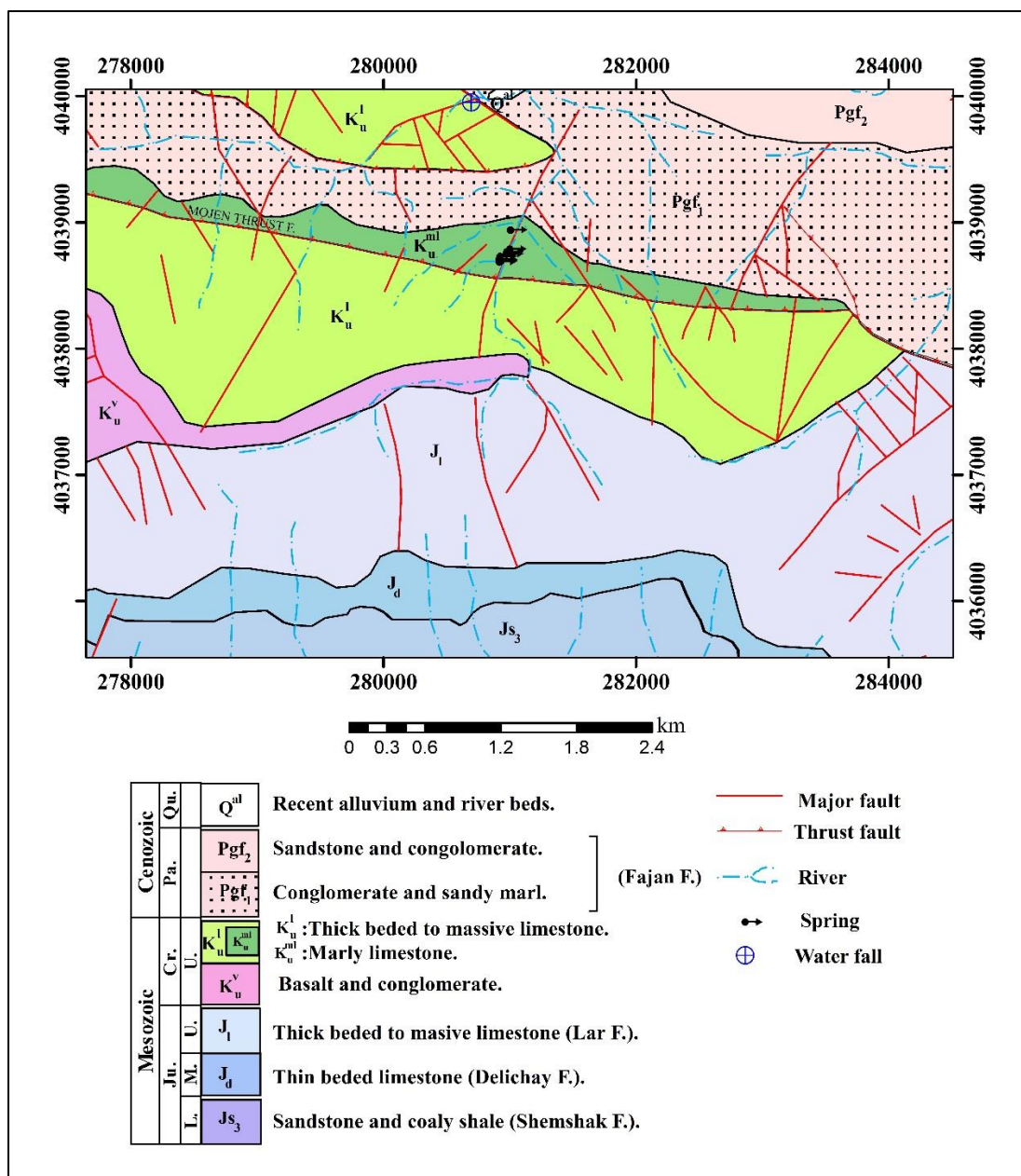
شکل ۱-۲- نمودار امپروترمیک منطقه مجن برای دوره آماری ۱۵ ساله

۴-۱- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات زمین‌شناسی در واحد ساختمانی البرز و بخشی از رشته کوه البرز شرقی واقع شده است (روند این رشته کوه‌ها شمال شرق - جنوب غرب می‌باشد). پهنای البرز شرقی به تدریج از سمت غرب به شرق کاهش می‌یابد (آقاناتی ۱۳۸۳). مهمترین واحدهای سنگی در منطقه مورد مطالعه شامل سازندهای شمشک، دلیچای، لار، سنگ‌های کرتاسه بالایی، فجن و رسوبات کواترنری می‌باشند. در این بخش چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی منطقه به طور مختصر ارائه خواهد شد.

۱-۴-۱- چینہ شناسی

شکل (۳-۱) نقشه زمین شناسی منطقه را نشان می دهد. براساس نقشه زمین شناسی، در محدوده‌ی مورد مطالعه واحدهای سنگی گوناگونی از مزوزوئیک تا عهد حاضر رخمون دارند که به اختصار معرفی می شوند:



شکل ۳-۱- نقشه زمین شناسی مچن (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود)

۱-۴-۱-۱- سنگ‌های مزوزوئیک

مجموعه توالی‌های سازندهای شمشک، دلیچای، لار و سنگ‌های کرتاسه بالایی سنگ‌های مزوزوئیک ناحیه مورد مطالعه را با ضخامت‌های قابل توجه تشکیل داده‌اند.

سازند شمشک (ژوراسیک زیرین)

تناوب‌های این واحد که بخش اعظم توالی‌های سازند شمشک را در منطقه مورد مطالعه تشکیل داده است، از تناوب‌های ماسه سنگ ارغوانی نازک تا ضخیم لایه و شیل‌های سبز نازک لایه زغال‌دار سازمان یافته است. در سطح زیرین ماسه سنگ‌های فوق موجوده و همچنین در توالی‌های مذکور آثار فسیل گیاهی به طور فراوان رؤیت می‌گردد. تناوب‌های فوق حدوداً دارای ۷۰۰ متر ضخامت می‌باشند که متعلق به ژوراسیک زیرین است.

سازند دلیچای (ژوراسیک میانی)

توالی‌های سازند دلیچای در ناحیه مورد مطالعه از ویژگی‌های خاصی برخوردار است و از آنجا که اساساً از تناوب‌های مارنی تشکیل شده است دارای رخنمون‌های کم ارتفاع، پست و فرسایشی می‌باشد. توالی‌های این سازند با ۲۸۴ متر ضخامت در دو برش کوه پتال و ناحیه پریخان مورد مطالعه دقیق چینه‌شناسی و محیط رسوبی قرار گرفته است. قاعده این سازند با هفت متر ضخامت ماسه سنگ آهکی به رنگ قهوه‌ای متعلق به محیط ساحلی آغاز می‌گردد. بر روی ماسه سنگ فوق، مارن‌های سبز با میان لایه‌هایی از سنگ آهک خاکستری حاوی آمونیت فراوان قرار دارد. در نهایت بر روی تناوب‌های یاد شده، تناوب سنگ آهک‌های متوسط لایه خاکستری روشن با مارن‌های سبز زیتونی آمونیت‌دار قرار می‌گیرد. در قسمت‌های بالایی ندول‌های چرت به طور پراکنده و اندک دیده می‌شود. توالی‌های سازند دلیچای در منطقه مورد مطالعه به واسطه یک ناپیوستگی فرسایشی موازی بر روی تناوب‌های سازند شمشک (JS3)، قرار داشته و در مرز بالایی خود به طور هم‌شیب و تدریجی توسط سنگ آهک‌های ضخیم لایه سازند لار پوشیده می‌شود.

سازند لار (ژوراسیک بالایی)

توالی‌های سازند لار در ناحیه مورد مطالعه از سنگ آهک‌های خاکستری روشن حاوی تعداد کمی آمونیت تشکیل شده است. این سنگ آهک‌ها ابتدا ضخیم لایه بوده که تدریجاً به سنگ آهک‌های توده‌ای و دیواره‌ساز تبدیل می‌شوند. این سنگ‌ها در قسمت‌های فوقانی خود دارای ندول‌های چرت فراوان هستند. البته تاکنون از این چرت‌ها به عنوان یکی از اختصاصات بارز سازند لار یاد شده است و شروع تناوب‌های این سازند را با ظهور یک افق چرتی معرفی کرده‌اند اما شروع سازند لار را با شروع سنگ آهک‌های ضخیم لایه‌ای می‌دانند که فاقد تناوب‌های مارنی در لابه‌لای خود هستند. با بررسی تغییرات عمودی رخساره‌های سازندهای دلیچای و لار می‌توان نتیجه گرفت که از زمان ژوراسیک میانی تا ژوراسیک بالایی پسروری دریا موجب شده تا رخساره‌های کم عمق سازند لار بر روی رخساره‌های عمیق سازند دلیچای ایجاد شوند. توالی‌های این سازند در ناحیه مورد مطالعه، حدوداً دارای ۶۰۰ متر ضخامت می‌باشند.

سنگ‌های کرتاسه بالایی

سنگ‌های کرتاسه بالایی شامل سه واحد (Ku^v) ، (Ku^l) و (Ku^{ml}) می‌باشند. واحد اول (Ku^v) در قاعده سنگ‌های کرتاسه بالایی در ارتفاعات جنوب باختر مجن برونزد داشته و از بازالت، لاوای اسپیلیتی و کنگلومرا تشکیل شده است و روند گسترش خاوری- باختری را نشان می‌دهد. واحد دوم شامل توالی‌های اصلی، با ضخامت‌های زیاد سنگ آهک‌های کرتاسه بالایی می‌باشند. این واحد از تناوب‌های سنگ آهک خاکستری روشن با مارن‌های سبز روشن در ابتدا واحد (Ku^{ml}) و سپس سنگ آهک‌های خاکستری متمایل به قهوه‌ای ضخیم لایه، توده‌ای و صخره‌ساز (Ku^l) که به مقدار زیاد فرسایش یافته و هوازده شده تشکیل شده است. همچنین در اثر بارش قطرات باران و جریان آب‌های جاری حفرات متعددی در آن‌ها دیده می‌شود. در این سنگ‌ها، صدف دوکفه‌ای‌ها، فسیل اینوسراموس قابل رؤیت است. سنگ‌های کرتاسه بالایی در منطقه مورد مطالعه با وجود وقفه و نبود چینه‌ای بر روی سنگ آهک‌های سازند لار قرار گرفته و در مرز بالایی خود به

واسطه ناپیوستگی و نبود چینه‌ای توسط توالی سازند فجن پوشیده می‌شود. این سنگ‌ها با ضخامت تقریبی ۴۰۰ متر دستخوش گسل خوردگی و چین خوردگی‌های متعددی شده است.



شکل ۱-۴- نمای از تناوب‌های سنگ آهک خاکستری روشن با مارن‌های سبز روشن

۱-۴-۱-۲- سنگ‌های سنوزوئیک

سنگ‌های سنوزوئیک ناحیه مورد مطالعه شامل توالی سازندهای فجن و رسوبات کواترنری می‌باشند.

سازند فجن (پالتوسن)

توالی سازند فجن با توجه به ضخامت و گسترش قابل توجهی که در پیرامون شهر مجن دارد براساس تنوع

رخساره‌ای به دو واحد تقسیم شده است و چهره‌ای قرمز رنگ را در منطقه نمایان می‌سازد.

واحد (Pg_{f1}): توالی‌های این واحد که بخش‌های فرسایشی و کم ارتفاع سازند فجن را می‌سازد و توالی‌های

واحد (Pg_{f2}) بر روی آن قرار می‌گیرند شامل کنگلومرای خاکستری روشن (قطعات و قلوه‌های این کنگلومرا

از سنگ آهک، ماسه سنگ ارغوانی و چرت تشکیل شده که دارای جورشدگی ضعیف و کرویت خوبی هستند)، ماسه سنگ متوسط لایه به رنگ سبز روشن و مارن ماسه‌ای قرمز است. تناوب‌های این واحد از سازند فجن دارای ضخامت تقریبی ۲۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه می‌باشد و چین‌خوردگی‌هایی را نیز متحمل شده که باعث افزایش گستره آن گردیده است.

واحد (Pg_{f2}): این واحد از سازند فجن که دارای توالی‌های ضخیم لایه و مرتفع‌ساز است به طور هم‌شیب بر روی تناوب‌های واحد (Pg_{f1}) قرار گرفته است. این واحد از تناوب‌های ماسه سنگ قرمز ضخیم لایه و کنگلومرای قرمز با بین لایه‌هایی از سنگ آهک و ماسه‌های متوسط و ضخیم لایه تشکیل شده است. کنگلومرای فوق عمدتاً از قلوه‌های گرد شده سنگ آهک و ماسه سنگ با قطعات چرت سازمان یافته است که ماتریکس قرمز رنگ و بسیار سستی دارد. توالی‌های سازند فجن با یک نبود چینه‌ای بر روی سنگ آهک‌های کرتاسه بالایی قرار گرفته و در مرز بالایی خود به طور هم‌شیب توسط تناوب‌های سازند زیارت پوشیده می‌شود. تناوب‌های این واحد از سازند فجن در منطقه مورد مطالعه تقریباً با ۸۰۰ متر ضخامت قابل رؤیت می‌باشد.

رسوبات کواترنری

رسوبات کواترنری در منطقه مورد مطالعه شامل واحد (Q^{al}) می‌باشد. این واحد شامل رسوبات پرکننده بستر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها از آبرفت‌های عهد حاضر و رسوبات رودخانه‌ای می‌باشد.

۱-۴-۲- زمین‌شناسی ساختاری منطقه

منطقه مورد مطالعه در زون البرز شرقی واقع شده است و با توجه به ویژگی‌های زمین‌ساختی البرز، منطقه در زمان گذشته دستخوش رویدادها و پدیده‌های مختلفی مانند عملکرد رویدادهای کوهزایی، چین‌خوردگی و گسل‌های متعدد بوده و ساختمان‌های جالبی را ایجاد کرده است. از جمله گسل‌های مهم در منطقه،

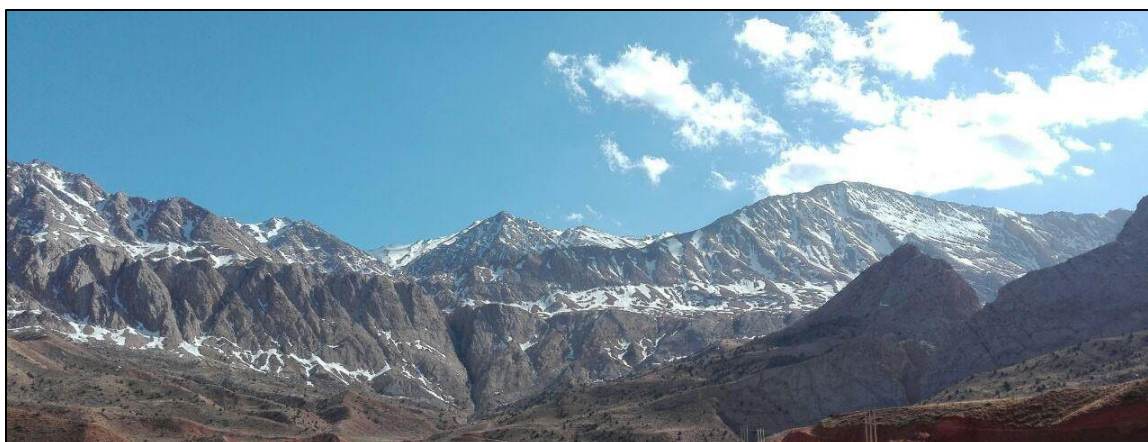
گسل رورانده مجن می باشد که در جنوب غربی شهر مجن واقع شده است و توانسته توالی های سازند فجن و سنگ آهک های کرتاسه بالایی را بر روی توالی های سازند لار براند. جهت حرکت فوق نیز تقریباً از سمت شمال به طرف جنوب می باشد. محدوده شمال غربی منطقه مورد مطالعه از مکان هایی است که شکستگی های متعدد و قابل توجهی را نشان می دهد و پدیده های زمین ساختی نظیر چین خوردگی و گسلش در آن مکان به تعداد قابل توجهی قابل رؤیت است. همچنین در منطقه مورد مطالعه ناودیس های متعددی رخنمون دارند که باعث به هم ریختگی شدید واحدهای ماسه سنگی و آهکی شده است.

۱-۵- ژئومورفولوژی منطقه

بررسی های ژئومورفولوژی با توجه به ارتباط مستقیم اشکال ژئومورفولوژیکی مناطق کارستی و تکامل آبخوان کارستی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشند. واحدهای ژئومورفولوژیکی شامل کوهستان (اختلاف ارتفاع نسبت به اطراف بیشتر از ۵۰۰ متر)، تپه ماهور (اختلاف ارتفاع نسبت به اطراف بین ۵۰ تا ۵۰۰ متر)، دشت (اختلاف ارتفاع نسبت به اطراف کمتر از ۵۰ متر) و رودخانه می باشند.

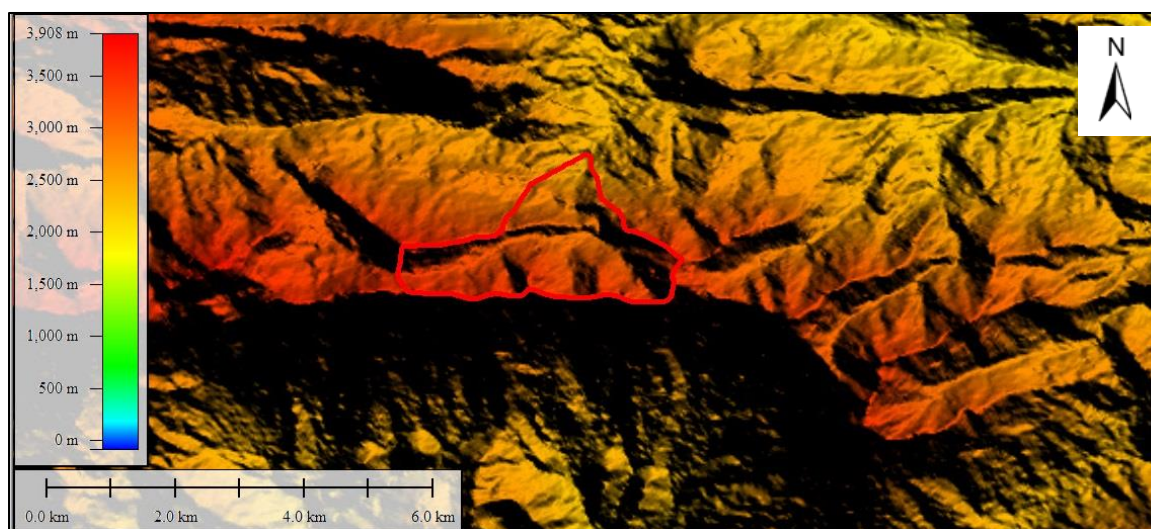
مهم ترین واحد ژئومورفولوژیکی در منطقه مورد مطالعه، واحد کوهستان می باشد که در بخش جنوبی حوضه آبگیر مورد مطالعه مشاهده می شود و شامل کوه چالوئی می باشد.

در مجاورت واحد ژئومورفولوژیکی کوهستان، واحد تپه ماهور هم به طور محدودی در بعضی از بخش ها مشاهده می شود.



شکل ۱-۵- نمایی از ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، حداقل ارتفاع در منطقه مورد مطالعه ۲۳۹۰ متر و حداکثر ارتفاع ۳۵۸۰ متر می‌باشد. شکل (۱-۶) تصویری از توپوگرافی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که با توجه به این شکل مناطق با ارتفاع ۳۲۰۰-۳۴۰۰ متر بیشترین فراوانی را دارند.



شکل ۱-۶- تصویر برجسته از توپوگرافی منطقه

۱-۶- هیدروژئولوژی منطقه

در مناطق کارستی بخش زیادی از نزولات جوی بسته به شرایط هیدرولوژی، هیدروژئولوژی، زمین ریخت‌شناسی و تکامل کارستی به درون زمین نفوذ می‌کند و رواناب کمتری نسبت به منابع غیر کارستی ایجاد می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، به دلیل نوع بارش (برف) رواناب پایه نداریم. همچنین به دلیل نفوذپذیری بالای سنگ‌های آهکی درز و شکاف‌دار در منطقه مورد مطالعه، تغذیه در منطقه صورت می‌گیرد، مگر اینکه بارش سیل آسا در منطقه رخ دهد که به دلیل شیب زیاد حوضه مانع تغذیه در منطقه شود. از طرف دیگر چشمه‌های کارستی بخشی از آب زیرزمینی را به سطح منتقل کرده و آب‌های سطحی ایجاد می‌کنند. آبراهه اصلی در منطقه مورد مطالعه که جزو زیر حوضه آبریز داستان می‌باشد و از کوه چالوئی سرچشمه می‌گیرد حدوداً ۵۳۳۰ متر طول دارد که در نهایت به رودخانه مجن منتهی می‌شود.

۱-۷- هیدروژئولوژی منطقه

هیدروژئولوژی هر آبخوان همواره تابعی از زمین‌شناسی می‌باشد. در واقع زمین‌شناسی در پیدایش و توسعه سفره آب زیرزمینی در هر ناحیه تأثیر بسزایی دارد. آبخوان‌های کارستی نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشند. بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه از سنگ آهک برهنه، درز و شکاف‌دار تشکیل شده است. بنابراین، منابع آب زیرزمینی در این منطقه به صورت کارست ظاهر شده است. در این منطقه، چندین چشمه در فاصله‌ی نزدیک به هم با حداقل مجموع دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه تشکیل شده‌اند. با توجه به بازدیدهای صحرایی و آزمایش‌های انجام شده مشخص شد که تمامی این چشمه‌ها از یک آبخوان تخلیه می‌شوند. همچنین متوسط هدایت الکتریکی برای چشمه‌های مورد مطالعه ۲۱۵ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد که بیانگر کیفیت مطلوب آب این چشمه‌ها است.

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین در ارتباط با بررسی خصوصیات

هیدروژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی

آبخوان‌های کارستی یکی از منابع آبی مهم دنیا بوده و با توجه به موقعیت خاص آب و هوای ایران و همچنین کمبود بارش و توزیع نامتناسب مکانی و زمانی بارش‌ها، منابع آب زیرزمینی و به خصوص منابع کارستی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. بنابراین، با توجه به گسترش وسیع سازندهای کارستی در کشور از یک سو، و افزایش جمعیت کشور و متعاقب آن نیاز روزافزون به منابع جدید آب از سوی دیگر، انجام مطالعات بر روی منابع کارستی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. هدف از این فصل، مروری بر مطالعات پیشین به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی می‌باشد. از این رو در این فصل، به مرور مطالعاتی در زمینه کارست، چشمه‌های کارستی و طبقه‌بندی آن‌ها، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی، ارتباط تکتونیک با کارست، تغذیه در کارست، حوضه آبرگیر در چشمه‌های کارستی و هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی پرداخته شده است.

۲-۱- تعریف کارست

سازندهای کارستی حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد از سطح خشکی‌ها را در بر می‌گیرند (Bonacci 1990). بنا به عقیده رئیسی (Raeisi 2002) سازندهای کارستی در ایران، حدود ۱۱ درصد از سطح کل کشور را می‌پوشانند که حدود ۲۵ درصد آن‌ها در رشته کوه‌های زاگرس قرار گرفته‌اند.

کارست عبارت است از گستره‌ای با مورفولوژی مشخص و یک سیستم زهکشی زیرزمینی قابل توجه که از حلالیت زیاد برخی از سنگ‌ها در آب‌های طبیعی حاصل می‌شود. نواحی کارستی عمدتاً بر روی سنگ‌های کربناته (به ویژه سنگ آهک) توسعه پیدا می‌کنند و علاوه بر این در روی دیگر سنگ‌ها که قابلیت انحلال دارند (مانند سنگ گچ و نمک) نیز ممکن است ایجاد شوند (کرمی ۱۳۸۸، Karami 2002). کارست پدیده‌ای فرسایشی می‌باشد که سازوکار آن انحلال و تخریب سنگ‌های قابل حل توسط آب‌های اسیدی در بخش‌های سطحی و زیرزمینی است. تشکیل کارست تحت شرایط مختلفی از جمله ویژگی‌های زمین‌شناسی، قابلیت انحلال سنگ‌ها و ترکیب سیالات مؤثر امکان‌پذیر است (سیادتی ۱۳۷۸). کارست‌ها عمدتاً در اثر انحلال سنگ‌های با قابلیت انحلال در تماس با آب‌های جوی به وجود می‌آیند (Twidale and Campbell 1993). علاوه بر عوامل فوق، مدت زمان تماس سنگ‌ها با آب و هوا، نوع آب و هوا، میزان پوشش گیاهی و میزان گاز کربنیک با منشأ زیستی نیز در توسعه و گسترش اشکال کارستی موجود در حوضه نقش بسزایی داشته است (ترشیزیان و همکاران ۱۳۷۹).

۲-۲- چشمه‌های کارستی

چشمه‌ها یکی از مهمترین عارضه‌های هیدروژئولوژیکی چرخه هیدرولوژیکی هستند (Fiorrilo 2014). چشمه‌های کارستی همچنین به عنوان بزرگترین چشمه‌های جهان با بیشترین میزان تخلیه در مقایسه با چشمه‌های دیگر آبخوان‌ها شناخته شده است (Kresic 2013). چشمه‌های کارستی مجراهای خروجی آب از حفرات فعال هیدرولوژیکی کارست در سنگ‌های محلول در آب چه در سطح و چه در درون زمین هستند (Bogli 1980). در سیستم‌هایی که آب از طریق مجاری و کانال‌های باز عبور می‌کند، آب می‌تواند به صورت چشمه به سطح زمین برسد. معمولاً چشمه‌های کارستی به دلیل قدرت نفوذ بالایی که سنگ‌های کارستی دارند بزرگتر و دائمی‌تر از چشمه‌های واقع در سایر نواحی‌اند (Ford and Williams 2007). چشمه‌های

کارستی محل تخلیه طبیعی آبخوان‌های کارستی است که بهره‌برداری از آن‌ها در مقایسه با استحصال آب از طریق حفاری و پمپاژ به مراتب آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر است. در این سیستم‌ها عمدتاً مجاری انحلالی در ارتباط با چشمه‌های کارستی بوده، بنابراین تجزیه و تحلیل، تغییرات و نحوه فروکش دبی، همچنین غلظت یون‌های محلول در چشمه‌ها می‌تواند منعکس‌کننده‌ی خصوصیات کل سیستم باشد (رضایی ۱۳۷۹). چشمه‌های موقت و دائم از خصوصیات مهم پهنه‌های کارستی به شمار می‌آیند که در نتیجه عمل مستقیم فرآیندهای ایجادکننده کارست به وجود آمده است. اکثر چشمه‌های مهم کارستی در امتداد سطح اساس فرسایش یعنی در مرز محیطی پلایه‌های کارستی، دره‌های رودخانه و ساحل دریا واقع شده‌اند. مشخصه مشترک این چشمه‌ها اعم از دائم یا موقت وابستگی مستقیم بین بارش و جریان خروجی آن‌هاست (Milanovic 1981). ظرفیت و مشخصه هیدرولوژیکی چشمه‌های کارستی به عواملی از قبیل سطح حوضه آبریز، ظرفیت تأخیری آبخوان، تخلخل مؤثر و ترکیب زمین‌شناسی وابسته است. تغییر ناگهانی کیفیت شیمیایی آب چشمه‌های کارستی پس از وقوع بارندگی یکی از ویژگی‌های آن‌هاست که البته این تغییرات در دامنه محدودی صورت می‌پذیرد (Ryan and Meiman 1996).

۲-۳- طبقه‌بندی چشمه‌های کارستی

از آنجا که عوامل به وجود آورنده‌ی چشمه‌ها بسیار متنوع است، بنابراین طبقه‌بندی چشمه‌ها نیز متنوع بوده و براساس ویژگی‌های مختلف از جمله شرایط زمین‌شناسی و ساختاری، خصوصیات آبخوان، میزان آبدهی، دائمی یا موقتی بودن، کیفیت شیمیایی آب، منشأ آب و ... طبقه‌بندی می‌گردند (Chow 1988). از بین این طبقه‌بندی‌ها، چهار طبقه‌بندی مهم شرح داده شده است.

۲-۳-۱- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس اختصاصات هیدرولوژیکی

فورد و ویلیامز (Ford and Williams 2007) چشمه‌های کارستی را براساس خصوصیات هیدرولوژیکی به سه گروه تقسیم نمودند:

الف- چشمه‌های آزاد (Free Springs): در این نوع چشمه‌ها آب در جهت شیب به داخل دره تخلیه می‌شود و سیستم کارستی کاملاً و یا به طور عمده از نوع کارست کم‌عمق است.

ب- چشمه‌های سدی (Dammed Springs): این نوع چشمه‌ها در نتیجه قرار گرفتن یک مانع در مسیر زهکشی آب زیرزمینی به وجود می‌آیند.

ج- چشمه‌های محبوس (Confined Springs): شرایط آرتزین در سنگ‌های کارستی که توسط یک سازند غیر قابل نفوذ محدود می‌شوند، باعث به وجود آمدن این چشمه‌ها می‌گردد.

۲-۳-۲- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس هیدروگراف جریان خروجی

بوگلی (Bogli 1980) چشمه‌ها را براساس هیدروگراف جریان خروجی، به چهار گروه چشمه‌های دائمی (Perennial Springs)، چشمه‌های فصلی (Periodic Springs)، چشمه‌های متناوب (Rhythmic Springs) و چشمه‌های اتفاقی (Episodic Springs) تقسیم نموده است.

۲-۳-۳- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس شرایط زمین‌شناسی و ساختاری

بوگلی (Bogli 1980) براساس شرایط زمین‌شناسی و ساختاری، چشمه‌ها را به چهار گروه چشمه‌های لایه‌ای (Bedding Springs)، چشمه‌های خروجی از شکستگی‌ها (Springs emerging from fractures)، انواع چشمه‌های سرریزی (Overflow types of springs) و چشمه‌های صعودی (Ascending spring) تقسیم نموده است.

۲-۳-۴- طبقه‌بندی چشمه‌ها براساس منشأ آب

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

الف- چشمه‌های Emergence: در این حالت منشأ آب مشخص نیست.

ب- چشمه‌های Resurgence: چشمه، خروجی مجدد یک رودخانه گم شده می‌باشد.

ج- چشمه‌های Exsurgence: نشت آب‌های کارستی را نشان می‌دهد.

۲-۴- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی

برای بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی سیستم‌های جریان آب زیرزمینی از یکسری اطلاعات جامع در مورد شیمی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود که وابسته به عوامل مختلفی از جمله زمین‌شناسی محل، میزان هوازدگی سنگ و نوع آن‌ها، کیفیت آب تغذیه‌ای به داخل سفره و واکنش‌های هیدروژئوشیمیایی می‌باشد (Coetsiers and Walraevens 2006). بررسی خواص هیدروژئولوژیکی سفره‌های کارستی به دلیل ناهمگنی زیاد این سفره‌ها مشکل است (Mohamadi and Field 2009, Mohamadi and Raeisi 2007). بنابراین، یکی از روش‌های رایج و کم هزینه مطالعه سفره‌های کارستی، بررسی تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی است (Raeisi *et al.* 2006). با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها می‌توان به بعضی از خصوصیات مسیر حرکت آب و نوع سیستم جریان غالب پی برد. در چهار دهه‌ی گذشته، به منظور شناخت رفتار هیدروژئولوژیکی لایه‌های آبدار کارستی در مناطق مختلف، مطالعات متعددی در زمینه‌ی بررسی تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در مناطق کارستی صورت گرفته است (نوری ۱۳۸۹). از اولین مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به کارهای زولت (Zolt 1960)، گارلز و کریست (Garrels and Christ 1965)، گامز (Gams 1966) و پیتی (Pitty 1966, 1968) اشاره شود. گارلز و کریست (Garrels and Christ 1965)، جریان زیرزمینی در سنگ‌های کربناته را به سیستم‌های باز و

بسته تقسیم نمودند. در سیستم باز، هیچ محدودیتی در میزان کربن دی‌اکسید مورد نیاز برای انحلال کربنات کلسیم وجود ندارد، در حالی که در سیستم بسته، پس از مصرف کربن دی‌اکسید موجود، انحلال سنگ آهک خاتمه می‌یابد. شاستر و وایت (Shuster and White 1971) و وایت (White 1969) جریان در آبخوان‌های کارستی را به دو سیستم افشان (Diffuse) و مجرای (Conduit) تقسیم نموده‌اند.

یکی از جامع‌ترین و مهم‌ترین تقسیم‌بندی‌های جریان در چشمه‌های کارستی، تقسیم‌بندی شاستر و وایت (Shuster and White 1971) است که در آن جریان در سفره‌های کارستی براساس میزان تغییرپذیری خواص فیزیکی و شیمیایی شامل هدایت الکتریکی، دما، یون‌های کلسیم و منیزیم، بی‌کربنات و نیز دبی در یک سال آبی، در طیف گسترده‌ای واقع می‌شود که دو حد نهایی آن سیستم جریان افشان و سیستم جریان مجرای است. در این تقسیم‌بندی، در سیستم‌های دارای جریان افشان، حرکت آب به صورت خطی، از خلال شکستگی‌های به هم پیوسته‌ای که بازشدگی کمتر از یک سانتی‌متر دارند، صورت می‌گیرد. تغییرات فیزیکی و شیمیایی زیادی در این نوع چشمه‌ها مشاهده نمی‌شود. در این نوع جریان، چشمه‌ها متعدد، پراکنده با دبی کم بوده و هدایت هیدرولیکی این سیستم‌ها تقریباً در کل توده به صورت یکنواخت می‌باشد. از نظر تغذیه، در این سیستم تغذیه به صورت مستقیم و از طریق درزه و شکاف‌های ریز موجود در سنگ‌های کربناته دربرگیرنده و پوشش‌های خاک فوقانی صورت می‌گیرد. در حوضه آبگیر این‌گونه سیستم‌ها، عارضه‌های ژئومورفولوژیکی مانند فروچاله و غار مشاهده نمی‌گردد و همچنین شاخص تغییرات سختی کل در این‌گونه جریان‌ها کمتر از ۵ درصد است. در سیستم‌های دارای جریان مجرای، جریان آب در کانال‌های بزرگ و مجاری لوله‌ای شکل که دارای بازشدگی بیشتر از یک سانتی‌متر می‌باشد، صورت می‌گیرد. این مجاری بزرگ بیشتر ناشی از پدیده‌های انحلالی صورت گرفته در کربنات‌ها می‌باشد. هدایت هیدرولیکی در این‌گونه سیستم‌ها نسبت به سیستم افشان بسیار بیشتر بوده و به همین دلیل جریان آب در آن‌ها عمدتاً به صورت آشفته می‌باشد و تخلیه طبیعی معمولاً از طریق یک چشمه بزرگ با دبی زیاد صورت می‌گیرد.

همچنین تغذیه در این سیستم، بیشتر از طریق درزه‌ها و فروچاله‌های موجود در سنگ‌ها که فاقد پوشش خاک و گیاه می‌باشند، صورت می‌گیرد و شاخص تغییرات سختی کل برای این گونه جریان‌ها در محدوده ۲۴-۱۰ درصد متغیر است. نیوسن (Newson 1972) و ترنان (Ternan 1972) تقسیم‌بندی مذکور را تأیید کرده‌اند. جاکوبسن و لانگمویر (Jacobson and Langmuir 1974)، براساس مطالعات خود بر روی چشمه‌های منطقه پنسیلوانیای آمریکا جریان در این چشمه‌ها را به چهار دسته‌ی مجرایبی، مجرایبی-افشان، افشان و افشان نوع گیتزبرگ (Gatesburg) تقسیم‌بندی نمودند. وایت (White 1988)، فورد و ویلیامز (Ford and Williams 1989)، سیستم جریان کارستی را به دو گروه جریان مجرایبی و افشان طبقه‌بندی نمودند. کریمی و همکاران (۱۳۸۳)، با مطالعه بر روی چشمه کارستی گیلان در جنوب غرب استان کرمانشاه جریان افشان کاذب را معرفی نمودند. در این سیستم‌ها چنانچه جریان مجرایبی حاکم باشد، تأخیر در پیوستن آب‌های دوردست باعث رفتاری شبیه سفره‌های افشان می‌شود. چنین سیستم جریانی که دارای ماهیت جریان مجرایبی و ظاهری به صورت جریان افشان می‌باشد، جریان افشان کاذب نامیده شده است.

۲-۴-۱- تغییرات آبدهی

تغییرات آبدهی چشمه‌ها به عنوان یکی از پارامترهای مهم در شناخت نوع سیستم جریان در آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود (کرمی و همکاران ۱۳۸۷). آبدهی چشمه‌ها در آبخوان‌های مختلف بسیار متفاوت می‌باشد و از کمتر از ۰/۰۰۱ لیتر در ثانیه تا بیشتر از ۱۰۰۰۰ لیتر در ثانیه متغیر است. آبدهی چشمه‌ها عمدتاً به وسعت حوضه آبرگیر چشمه، تغذیه سالانه در حوضه آبرگیر و تراوایی آبخوان وابسته می‌باشد (Milanovic 1981). مهمترین پارامتری که تغییرات آبدهی چشمه‌های کارستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تراوایی آبخوان است. به این ترتیب که هر چه تراوایی آبخوان کارستی که از نوع تراوایی ثانویه است، بیشتر باشد تغییرات آبدهی چشمه بیشتر و هرچه تراوایی کمتر باشد تغییرات آبدهی چشمه کمتر خواهد بود. در

حقیقت تغییرات آبدهی چشمه‌های کارستی، یک معیار مهم برای تفکیک آبخوان‌های کارستی با سیستم غالب جریان مجرای از آبخوان‌های کارستی با سیستم غالب جریان افشان است (کرمی و همکاران ۱۳۸۷). دلیل استفاده گسترده از پارامتر دبی چشمه‌های کارستی در مطالعات کارست توسط محققین مختلف این است که تفسیر قابل اطمینانی از ویژگی‌های سفره‌های کارستی فراهم می‌آورند و همچنین اندازه‌گیری آن‌ها آسان است (Mohamadi and Field 2009). جاکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir 1974)، ضریب تغییرات آبدهی را برای چشمه‌های کارستی دره نیتانی محاسبه نموده‌اند. براساس مطالعات آن‌ها ضریب تغییرات آبدهی چشمه‌ها با سیستم جریان مجرای بزرگتر از ۱۵۰ درصد و برای چشمه‌های مجرای-افشان بزرگتر از ۴۰ درصد و برای چشمه‌های افشان کمتر از ۳۰ درصد برآورد شده است. مطالعاتی که توسط رئیسی و کرمی (Raeisi and Karami 1997) در چشمه برغان در شمال غربی شیراز صورت گرفت، پارامترهای هدایت الکتریکی، pH و دمای آب هر ۲۰ روز طی دوره ۳۲ ماهه اندازه‌گیری کرده و نمونه‌های آب در زمینه آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی را آنالیز نموده و از اندازه‌گیری نرخ جریان به طور روزانه و همچنین از مدل کامپیوتری WATEQF نیز استفاده کردند. هیچ تفاوت قابل توجهی بین ضریب اولین و دومین فرود مشاهده نکردند، جریان پایه، ۷۰ درصد کل جریان را در رژیم اولین فرود و ۱۰۰ درصد را در رژیم دومین فرود تشکیل می‌دهد. تنوع هدایت الکتریکی (EC)، غلظت کلسیم و بی‌کربنات و ضریب اشباع کلسیت طی مدت تحقیق ناچیز بود، بدین مفهوم که ویژگی‌های سفره آب زیرزمینی می‌تواند رفتار شیمیایی چشمه را کنترل کند. مورفولوژی و ژئولوژی حوضه آبرگیر چشمه برغان و داده‌های نمودارهای آب و مواد شیمیایی نشان می‌دهد که سیستم هیدرولوژیکی این چشمه دارای جریان افشان است.

کریمی‌وردنجان (۱۳۸۴)، با بررسی آنالیزهای هیدروشیمیایی و سنجش میزان آبدهی چشمه‌های آهکی موگرمون و سرآسیاب شهرستان دهدشت مشخص نمود که چشمه‌های مزبور از سازند آهکی سروک تغذیه می‌گردند و دارای سیستم مجرای-افشان می‌باشند و درصد جریان مجرای در چشمه موگرمون بیشتر از

چشمه سرآسیاب می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد سیستم مزبور دارای یک رژیم جداگانه ناشی از ذوب برف می‌باشد. سامانی و زارعی (۱۳۸۵)، با بررسی تغییرات دبی چشمه ششپیر و ساسان در شمال غرب شیراز به این نتیجه رسیدند، که بده چشمه ششپیر شامل ۹۶/۹ درصد جریان پایه (افشان) و ۳/۱ درصد جریان سریع (مجرایبی) می‌باشد، در حالی که سهم جریان افشان و مجرایبی برای چشمه ساسان به ترتیب ۹۳/۱ درصد و ۶/۹ درصد است، بنابراین توسعه کارست در آن بیشتر است. شفیع‌مطلق و لشکری‌پور (۱۳۸۷)، برای اولین بار بر روی چشمه کارستی کورسا دهدشت در جنوب غربی ایران مطالعه کرده‌اند. با بررسی‌های هیدروشیمیایی و آبنمود روزانه چشمه به این نتیجه دست یافتند که سیستم جریان در این چشمه از نوع مجرایبی-افشان است. مینویی و همکاران (۱۳۸۹)، به بررسی خصوصیات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی قلوز و تلوکسان در یال شمالی کوهستان شاهو پرداختند، نتایج حاصله با استفاده از ضرایب بده و دیگر خصوصیات هیدروژئوشیمیایی نشان می‌دهند که سیستم غالب در هر دو چشمه از نوع مجرایبی است. کریمی‌وردنجانی و همکاران (۱۳۹۲)، چشمه کارستی سوسن در شهرستان اندیکا از استان خوزستان را مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور آبدهی و خصوصیات هیدروشیمیایی این چشمه در فواصل کوتاه مدت اندازه‌گیری گردید و تغییرات زمانی پارامترهای فیزیکیوشیمیایی مورد تحلیل قرار گرفته است. مطابق با هیدروگراف حدود ۳۱ درصد از آبدهی چشمه سوسن، مربوط به جریان سریع می‌باشد و سیستم جریان در این چشمه را از نوع افشان-مجرایبی می‌دانند. با توجه به روند تغییرات هیدروگراف چشمه و ضرایب فرود، عمده آبدهی چشمه مربوط به جریان پایه است.

۲-۴-۲- تغییرات دمای آب

اندازه‌گیری دقیق دمای آب زیرزمینی در بسیاری از تحقیقات آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت است. نوسانات فصلی دما معمولاً در اعماق ۱۰ تا ۲۰ متری زیر زمین دیگر اثر چندانی ندارد، بنابراین دمای آب زیرزمینی

در این اعماق اساساً ثابت و برابر با دمای متوسط سالانه منطقه می‌باشد. به منظور بررسی تغییرات دمای آب در چشمه‌های کارستی بایستی از دماسنج‌های دقیق استفاده نمود زیرا تغییرات دما در چشمه‌های کارستی حدود چند دهم درجه سانتی‌گراد می‌باشد (نوری ۱۳۸۹). پیتی و همکاران (Pitty et al. 1979)، با مطالعه بر نوسانات درجه حرارت در آب‌های آهکی مرکز و جنوب پنینز (Pennines) انگلستان، اعتقاد دارند که سه عامل دمای آب زیرزمینی، عمق و اندازه جریان آب زیرزمینی و درجه کارستی شدن آبخوان بین گستره سطحی و جریان آب زیرزمینی در متغیر بودن درجه‌ی حرارت آب در داخل کارست نقش دارند. تغییرات دمای آب چشمه‌های کارستی یکی دیگر از معیارهای تعیین سیستم جریان در چشمه کارستی است. رئیسی و کرمی (Raeisi and Karami 1997)، با مطالعه بر روی چشمه‌ی کارستی برغان در شمال غرب شیراز، به این نتیجه دست یافتند، هنگامی که جریان افشان باشد به دلیل اینکه جریان آب به آهستگی از میان درز و شکاف‌های کوچک صورت می‌گیرد، تحت تأثیر تغییرات دمای هوا قرار نمی‌گیرد و تحت تأثیر دمای سنگ‌های تشکیل‌دهنده‌ی سفره است اما در یک سفره کارستی که در آن سیستم جریان مجرای غالب است، به دلیل اینکه جریان آب از میان کانال‌ها و شکستگی‌های بزرگ انجام می‌شود، بنابراین دمای آب خروجی از چشمه‌های کارستی تحت تأثیر تغییرات دمای هوا قرار می‌گیرد. اد (Ede 1972)، در یک بازدید یک‌ساله در منطقه جنوب والز (بریتانیای بزرگ) دریافت محدوده‌ی تغییرات دمای چشمه‌های مجرای از ۱۱-۶/۵ درجه سانتی‌گراد و برای چشمه‌های افشان از ۱۱/۱-۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جاکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir 1974)، ذکر کرده‌اند که ضریب تغییرات دمای آب برای تشخیص نوع سیستم کارستی بهترین شناساگر است. آن‌ها ملاحظه نمودند که ضریب تغییرات دما در چشمه‌های کارستی مجرای در منطقه مورد مطالعه ۲۶/۹ و در چشمه‌های افشان ۱/۴ درصد می‌باشد. کوول و فورد (Cowell and Ford 1983)، با بررسی تغییرات دمایی چشمه‌های کارستی جنوب انتاریو کانادا نشان دادند که تغییرات دمای آب در یک سال آبی در چشمه‌های مجرای در حدود ۵/۹ درجه سانتی‌گراد و در

چشمه‌های کارستی افشان ۱/۳۲ درجه است. این دو همچنین اعتقاد دارند که بررسی تغییرات زمانی درجه حرارت در چشمه‌های کارستی می‌تواند نوع جریان در آهک‌های دربرگیرنده‌ی چشمه را مشخص نمایند. کرمی (۱۳۸۳)، در مطالعاتش در چشمه کارستی چشمه علی دامغان، ضریب تغییرات دما در این چشمه با رژیم جریان مجرای را ۱/۳۸ درصد تخمین زد. در چشمه‌های کارستی با سیستم جریان افشان، ضریب تغییرات دمای آب کمتر از ۵ درصد و در چشمه‌های کارستی با سیستم جریان مجرای بزرگتر از ۵ درصد است.

۲-۴-۳- تغییرات هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی آب با کل املاح محلول در آب رابطه مستقیمی دارد. از آنجایی که این پارامتر به عنوان نماینده مناسبی از کل املاح محلول در آب بوده و به آسانی توسط یک هدایت‌سنج الکتریکی با دقت بسیار بالا قابل اندازه‌گیری است، یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در مطالعات منابع آب به شمار می‌رود. محدوده تغییرات هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی در مقایسه با آبخوان‌های آبرفتی به طور قابل توجهی کمتر است 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 می‌باشد (Scanlon and Thraikill 1987, Newson 1972, Raeisi and Karami 1997). جاکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir 1974)، براساس یافته‌هایشان چشمه‌های کارستی دره نیتانی را به ۴ گروه تقسیم کردند:

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

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

ج- چشمه‌های افشان با هدایت الکتریکی بین ۴۰۰ و ۶۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، ضریب تغییرپذیری برای هدایت الکتریکی و تخلیه به ترتیب کمتر از ۱۰ درصد و کمتر از ۳۰ درصد.

د- چشمه‌های افشان تیپ گیتزبرگ (Gatesburg) با هدایت الکتریکی بین ۲۶۰ و ۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، pH بیشتر از ۷/۸ و ضریب تغییرپذیری هدایت الکتریکی کم.

رئییسی و همکاران (Raeisi et al. 1993)، به منظور مطالعه‌ی وضعیت انحلال کانی‌های مختلف در آبخوان‌های کارستی، تعداد ۷۲ چشمه واقع در سازند آسماری- جهرم را مورد مطالعه قرار داده‌اند. هدایت الکتریکی تمامی این چشمه‌ها، کمتر از ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد، که نشان‌دهنده‌ی عدم دخالت ناخالصی‌های محلی در کیفیت آب این چشمه‌هاست. بر این اساس، ایشان به این نتیجه رسیدند که ۸۵/۷ درصد از کل مواد جامد حل شده شامل یون‌های کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات است و بقیه‌ی یون‌ها به ترتیب شامل سولفات، کلر، سدیم و پتاسیم می‌باشد. ضریب تطابق کاتیون‌ها و آنیون‌های اندازه‌گیری شده قابل توجه است. چنان‌چه مشاهده می‌گردد یک تطابق بسیار خوب بین بی‌کربنات با کلسیم و منیزیم و میان سولفات با کلسیم، منیزیم و سدیم و میان کلر و سدیم وجود دارد. ارتباط میان هدایت الکتریکی و غلظت هر یک از یون‌ها نشان می‌دهد که کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، سدیم و سولفات تطابق بسیار خوبی با هدایت الکتریکی نشان می‌دهند، در حالی که کلر و پتاسیم دارای یک تطابق بسیار ضعیف است. دسمارایس و روجستاکزر (Desmarais and Rojstaczer 2002)، با استفاده از پاسخ‌های فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی به بارندگی‌های ناگهانی مای‌ناردویل در ایالت تنسی آمریکا، یک مدل مفهومی برای منشأ و طبیعت جریان آب زیرزمینی در آبخوان کارستی منطقه مورد مطالعه ارائه نمودند. براساس این مدل، پاسخ چشمه با توجه به تغییرات هدایت الکتریکی به سه مرحله تقسیم می‌شود:

الف- مرحله فلاشینگ (Flashing period): در این مرحله بعد از رخداد بارندگی، همراه با بیرون رانده شدن آب‌های قبلی ناحیه اپی کارستی یا فراتیک عمیق که زمان ماندگاری زیاد داشته و املاح زیادی را در خود حل کرده‌اند، شیب منحنی هدایت الکتریکی چشمه نیز افزایش می‌یابد.

ب- مرحله رقیق‌شدگی (Dilution period): در این مرحله با رسیدن نخستین آب‌های بارندگی به چشمه، هدایت الکتریکی شروع به کاهش می‌نماید و زمانی هدایت الکتریکی به حداقل مقدار خود می‌رسد که حداکثر آب بارندگی در آبدهی چشمه مشارکت داشته باشد.

ج- دوره برگشت (Recovery period): در این مرحله هدایت الکتریکی شروع به افزایش می‌نماید و تا بارش یا بارش‌های بعدی این روند ادامه پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، در این مرحله سیستم در حال برگشت به شرایط تعادل (قبل از بارندگی) است.

کریمی و همکاران (۱۳۸۳)، با مطالعه بر روی چشمه کارستی گیلان در جنوب غرب استان کرمانشاه بیان نمودند که در حوضه‌های کارستی وسیع که شکل حوضه آبگیر باریک و کشیده می‌باشد، مؤلفه‌های مختلف جریان آب به طور همزمان به چشمه نمی‌رسد. چنانچه هدایت الکتریکی و ترکیب ایزوتوپی در چنین چشمه‌هایی در فصل خشک دارای روند نزولی باشد، بیانگر پیوستن آب مجرای نواحی دوردست در طی این دوره می‌باشد.

۲-۴-۴- تغییرات غلظت یونی

آب زیرزمینی به مقدار کم یا زیاد حاوی نمک‌های محلول می‌باشد. نوع و غلظت این املاح وابسته به سنگ‌های در تماس با آب، سرعت حرکت آب، مسافتی که آب طی کرده و منشأ آب است. بیشتر مواد محلول در آب ناشی از انحلال سنگ‌ها می‌باشد. با توجه به مدت ماندگاری آب در لایه‌های آب و طول مسیری که آب طی می‌کند، ترکیب شیمیایی آن از نظر نوع و مقدار تغییر می‌کند (ازانی ۱۳۹۵). لویز و

همکاران (Lopez et al. 2001)، با بررسی و نمونه‌برداری ۱۹ ماهه از ۶ چشمه کارستی در آبخوان کبرا-الکید (Cabra-Alcaide) واقع در جنوب اسپانیا، به تعیین نسبت‌های یونی (عمدتاً نسبت کلسیم به منیزیم) و آنالیزهای آماری ساده و چند متغیره نمونه‌ها پرداخته‌اند. نتایج بدست آمده، نشان‌دهنده جریان افشان با یک جریان پیستونی می‌باشد که مرتبط با بارش است. آن‌ها همچنین به این نتیجه دست یافتند که برای ارزیابی دقیق‌تر درجه کارستی‌شدن، علاوه بر خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها باید وضعیت هیدرودینامیکی چشمه‌ها را نیز در نظر گرفت. لامبان و همکاران (Lamban et al. 2015)، به آنالیزهای هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی ۲۹ چشمه کارستی در پنومپ (PNOMP) اسپانیا، در فاصله‌ی زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده بیانگر این است که رخساره‌های شیمیایی آب در این منطقه کلسیم-بی‌کربنات و کلسیم، منیزیم-بی‌کربنات می‌باشد و اختلاف بین ارتفاع منطقه تغذیه و تخلیه نقش مهمی در تغییر رخساره دارد. نوری (۱۳۸۹)، با مطالعه بر روی نسبت کلسیم به منیزیم چشمه کارستی آبدانان به این نتیجه دست یافتند که پایین بودن درصد خلوص آهک در سازند ایلام-سروک بیانگر پتانسیل کمتر آن برای تشکیل سیستم‌های کانالی و توسعه کارست است و سیستم غالب جریان از نوع افشان می‌باشد.

۲-۵- ارتباط تکتونیک با کارست

عوامل تکتونیک نظیر درزه‌ها و گسل‌ها به عنوان نقاط ضعف سازندها و واحدهای زمین‌شناسی به شمار رفته، راهی برای عبور آسان آب و محلی برای تجمع آب به صورت مخازن زیرزمینی می‌باشند. همچنین به طور ویژه، این گروه از عوامل، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی هیدروژئولوژی سنگ‌های کربناته و آهکی دارد، زیرا شروع شبکه‌های کارستی با انحلال آهک آغاز می‌شود. این تأثیر به طور مستقیم به وسیله شرایط جریان آب اعمال می‌شود که به توزیع منافذ بستگی دارد و خود به وسیله تکتونیک، درون سنگ آهک به وجود آمده است. کاستنینگ (Kastning 1977)، تحقیقی پیرامون نقش گسل‌ها در جریان آب زیرزمینی در

سنگ‌های آهکی انتشار داد. وی سه نقش مثبت، منفی و خنثی برای گسل‌ها در مقابل جریان آب زیرزمینی در نظر گرفت. نقش مثبت گسل‌ها در جایی است که بر اثر افزایش شکستگی و ضعف ساختمانی منجر به افزایش نفوذپذیری محلی شوند. نقش منفی آنها هنگامی است که به دلیل وجود صفحه گسلی ناتروا، جلوی جریان آب زیرزمینی را سد کنند به طوری که جریان را به سوی دیگر هدایت کنند و یا منجر به ظهور چشمه در سطح زمین گردند. چنانچه وجود گسل، اثری در جهت جریان آب زیرزمینی نگذاشته باشد نقش آن گسل خنثی می‌باشد. میزان تأثیر عمل گسل بستگی به وضعیت ساختمانی و بافتی دو سوی گسل دارد که مربوط به فاکتورهایی چون: ترکیب سنگ آهک، شرایط محلی فشار و درجه حرارت در خلال تکتونیزم و طبیعت نیروهای فشاری یا کششی حین گسلش می‌باشد. گونی (Gunay 2006)، با مطالعه بر روی چشمه‌های کارستی ساکاریاباسی در سیفتلر ترکیه با استفاده از ابزارهای هیدروژئولوژی، داده‌های شیمیایی و ایزوتوپی به تعیین ارتباط هیدروژئولوژیکی بین مناطق تغذیه و تخلیه چشمه‌ها پرداخت. نتایج نشان می‌دهد که در تشکیل این چشمه‌ها، تکتونیک نقش اصلی را ایفا می‌کند و باعث ایجاد یک توپوگرافی ملایم در منطقه مورد مطالعه شده است. زابیدی و فریتاس (Zabidi and Freitas 2006)، با مطالعات ساختاری در سنگ آهک کوالامپور با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و شکستگی‌ها بیان کردند که هر جا تعداد شکستگی‌ها و ارتباط بین آنها در مناطق کارستی زیاد باشد احتمال زهکشی هم بیشتر است و بیشترین هجوم آب در شکستگی‌ها خواهد بود. کریمی و همکاران (Karimi et al. 2007)، با تهیه نقشه چین‌های زاگرس پی بردند که چین‌ها نقش مهمی در الگوی جریان آب زیرزمینی مخصوصاً در سفره‌های کارستی سطحی که کنترل چینه‌ای جریان در آنها بالاست دارند. در سفره‌های کارستی عمیق نقش چین‌ها محدود می‌شود. در محدوده سطحی کارست جایی که کف سفره‌ی کارستی بالاتر از سطح اساس هیدرولوژیکی است آب زیرزمینی در نزدیکی کف سفره و بالای لایه نفوذناپذیر زیرین جریان می‌یابد. در نتیجه ناودیس پلاژ شده مسیرهای اصلی جریان آب زیرزمینی را تشکیل داده و تاقدیس‌ها به صورت مرز جداکننده‌ی سفره‌ها عمل

می‌کنند. در محدوده عمیق کارست، ناودیس‌ها اغلب به صورت کامل توسط آب زیرزمینی اشباع می‌شود و سرریز آب زیرزمینی می‌تواند از طریق تاقدیس به ناودیس مجاور وارد گردد. در مواردی که هسته نفوذناپذیر یک تاقدیس بالاتر از محل خروج چشمه‌ها باشد، می‌توان نتیجه گرفت که حرکت آب از یک یال به یال دیگر تاقدیس وجود ندارد. گولدشایدنر و نیوکام (Goldscheider and Neukum 2010)، با مطالعه در آبخوان‌های کارستی و نترستادن (winterstaudewn) اتریش به این نتیجه رسیدند که ناودیس‌های پلانژدار اصلی‌ترین مجاری آبگذر زیرزمینی را به وجود می‌آورند و جریان آب زیرزمینی زمانی که سطح اساس آبخوان کارستی بالاتر از سطح اساس سنگ کف باشد از شیب لایه‌ها به سمت خط‌القعر ناودیس پلانژدار است و تاقدیس‌ها به عنوان مرز محلی تقسیم آب عمل می‌کنند. شکری و همکاران (۱۳۷۴)، به بررسی تأثیر تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت‌یابی جریان آب زیرزمینی در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان پرداختند. با استفاده از داده‌های آبدهی چشمه و پارامترهای فیزیکی‌وشیمیایی به این نتیجه رسیدند که عملکرد گسل‌ها در منطقه باعث شده که این چشمه به عنوان سطح اساس فرسایش رخنمون‌های آهکی ایفای نقش نماید و آب به سمت چشمه حرکت کند.

۲-۶- تغذیه در کارست

تغذیه لایه آبدار کارستی به سه طریق، نفوذ به داخل خاک، نفوذ از طریق درزه و شکاف‌ها و نفوذ به داخل فروچاله‌ها (Sinkholes)، صورت می‌گیرد. بخش عمده نفوذ در سنگ‌های آهکی از طریق مجاری انحلالی و درز و شکاف‌ها صورت می‌گیرد. ظرفیت نفوذ در این شکاف‌ها وابسته به عواملی از قبیل: میزان بازشدگی شکاف‌ها، فاصله بین شکاف‌ها، عمقی بودن شکاف‌ها، وجود و یا عدم وجود خاک و سنگریزه و شیب عمومی رخنمون می‌باشد (کرمی ۱۳۷۲). تغذیه می‌تواند به صورت مستقیم (تغذیه نقطه‌ای) از طریق تعدادی پانور،

دولین، استاول و یا توسط نفوذ انتشاری از سطوح برکه مانند طبیعی و همچنین از طریق نفوذ مستقیم آب باران و آب ناشی از ذوب برف به داخل شبکه‌های درز و شکاف صورت گیرد.

براساس مطالعات وایت (White 2002)، در تغذیه سفره‌های کارستی چهار حالت وجود دارد:

الف- تغذیه خودزا (Autogenic recharge): منطقه به طور کامل از سنگ‌های کارستی تشکیل شده و به وسیله آبهای بارندگی تغذیه می‌شوند.

ب- تغذیه دگرزا (Allogenic recharge): آب‌های مناطق کارستی مجاور باعث تغذیه سیستم می‌شوند.

ج- رواناب درونی (Internal runoff): آب باران سریعاً از طریق فروچاله (Sinkhole) وارد سیستم می‌شود.

د- آب باران در سنگ‌های پوشاننده سفره کارستی تجمع می‌یابد و مازاد این آب از طریق شکاف‌های توسعه یافته وارد سفره کارستی می‌گردد.

جیانگ و گو (Jiang and Gau 2010)، با استفاده از روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی، هیدروشیمیایی و ایزوتوپی به بررسی منشأ تغذیه چشمه کارستی لینگ‌شای در ایالت متحده پرداختند. نتایج به دست آمده بیانگر این است که منشأ آلونیک (رودخانه‌های سطحی) در تغذیه این چشمه دخالت ندارند و چشمه بیشتر از آبخوان عمیق منطقه مورد مطالعه تغذیه می‌شود. کاتسانو و همکاران (Katsanou et al. 2010)، به منظور بررسی منشأ آب چشمه استفانی کوک‌کینو در غرب یونان، از وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و سری‌های زمانی داده‌های هیدروشیمیایی چشمه مذکور استفاده کرده‌اند. دمای بالا، بالا بودن غلظت یون‌های Li ، F ، Na ، B و تیپ آب Na-Ca-HCO_3 همگی بیانگر این مطلب بودند که چشمه مذکور از آبخوان‌های عمیق منشأ می‌گیرد. باقری و همکاران (۱۳۸۶)، با استفاده از اطلاعات هیدروشیمیایی، ایزوتوپی، بیلان و بررسی‌های تکتونیکی مطالعاتی بر روی چشمه‌های کارستی بخش شرقی تاقدیس راوندی (خاستگاه سد سیمره) انجام دادند. آن‌ها در این بررسی چندین منشأ احتمالی برای چشمه‌های مذکور در نظر گرفته‌اند و

با در نظر گرفتن جایگاه تکتونیکی و زمین‌شناختی، توپوگرافی و شیب هیدرولیکی مشخص نمودند که منشأ تغذیه این چشمه‌ها، تاقدیس واقع در بالا دست تاقدیس راوندی است.

۲-۷- حوضه آبگیر در چشمه‌های کارستی

در منطقه کارستی، تعیین حدود حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی یکی از پارامترهای بسیار دشوار می‌باشد. منظور از حوضه آبگیر، ناحیه‌ای است که تمام نقاط روی این حوضه در رساندن آب به نقطه خروجی یا چشمه سهیم می‌باشند. تعیین حوضه آبگیر پایه و اساسی برای حفاظت از ذخایر آبی، مدیریت و مدل‌سازی مفهومی چرخه آب در توده‌های کارستی می‌باشد (Bonacci and Andric 2015).

ریاحی‌پور و کلانتری (۱۳۸۷)، به بررسی تعیین حوضه آبگیر چشمه کارستی پیرغار در دامنه شمالی کوه سالدوران در ۳۰ کیلومتری جنوب غرب شهرکرد پرداختند. آن‌ها با بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه کارستی مذکور و همین‌طور بررسی‌های هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی، حوضه آبگیر و محدوده احتمالی تأمین‌کننده آبدهی این چشمه را تعیین نمودند. نجفی و همکاران (۱۳۸۸)، با توجه به وضعیت ژئومورفولوژی و هیدروژئولوژی منطقه کارستی جنوب شرق روانسر، حوضه‌های آبگیر چشمه‌های کارستی منطقه را مشخص کردند. آن‌ها با توجه به بررسی بیلان ملاحظه کردند که حوضه‌های آبگیر چشمه با دقت بالایی ترسیم شده‌اند. کرمی و همکاران (۱۳۹۰)، در مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی وجود و یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی میان چشمه کارستی امام‌قیس با منابع آب مجاور از روش بیلان هیدروژئولوژیکی معکوس جهت تخمین مساحت حوضه آبگیر استفاده نمودند. رحیمی‌دهکردی و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی حوضه آبگیر چشمه کارستی پیرغار و سراب باباحیدر در دامنه شمالی کوه سالدوران در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. آن‌ها با بررسی‌های هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی، حوضه آبگیر و محدوده احتمالی تأمین‌کننده آبدهی این چشمه‌ها را تعیین نمودند. کریمی و همکاران (Karimi et al. 2005)، با استفاده از سری زمانی

پارامترهای فیزیکیوشیمیایی و هیدروگراف چشمه‌های کارستی تاقدیس پودنو واقع در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های زاگرس، به تعیین حوضه آبریز احتمالی چشمه‌های مذکور پرداختند. آن‌ها همچنین به منظور ارزیابی دقیق‌تر منشأ احتمالی این چشمه‌ها از وضعیت زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، توپوگرافی، لیتولوژی آبخوان‌های کارستی و سازندهای دربرگیرنده‌ی آن‌ها، ارتفاع سطح آب در پیزومترها و موازنه آبی آبخوان‌های کارستی استفاده نمودند. اشجاری و رئیسی (Ashjari and Raeisi 2006)، با مطالعه بر روی ۷۲ تاقدیس کارستی در زاگرس، فرضیاتی را برای تعیین محل تقریبی حوضه آبریز چشمه کارستی ارائه نمودند که شامل موارد زیر می‌باشند:

- حوضه آبریز در نزدیکترین فاصله از خروجی چشمه قرار می‌گیرد.
- ارتفاع تمام نقاط حوضه آبریز باید از ارتفاع محل خروجی چشمه بیشتر باشد.
- هیچ مرز نفوذناپذیری حوضه آبریز را قطع نکند.
- میزان ورودی و خروجی از هر حوضه برابر باشد.
- خصوصیات ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و تکتونیکی باید با حوضه تعیین شده مطابقت داشته باشد.
- پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب با سنگ‌شناسی آبخوان کارستی و سازندهای مجاور همخوانی داشته باشد.

۲-۸- هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی

هیدروگراف (Hydrograph)، نموداری است که تغییرات زمانی سطح آب یا بده جریان را نشان می‌دهد (Linsley *et al.* 1988). شکل هیدروگراف یک چشمه نشان‌دهنده خصوصیات هیدرولیکی آبخوان تغذیه‌کننده آن است. به ویژه شکل و نرخ منحنی فرود چشمه‌ها اطلاعات با ارزشی از خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان زهکشی شده توسط چشمه فراهم می‌کند. از آنجا که در یک سیستم کارستی دو

نوع جریان آشفته و خطی اتفاق می‌افتد، از طریق مطالعه هیدروگراف چشمه‌های کارستی می‌توان سهم هر یک از این دو نوع جریان را در منطقه مورد مطالعه برآورد نمود (سامانی و زارعی ۱۳۸۵، Karami 2002).

با مطالعه هیدروگراف چشمه کارستی می‌توان به اطلاعاتی راجع به ویژگی‌های ذخیره‌ای، نوع محیط متخلخل، نوع جریان، میزان حجم تخلیه در زمان‌های مختلف و پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان دست پیدا کرد (Amit et al. 2002). منحنی فرود چشمه‌های کارستی اطلاعات مهمی در مورد ویژگی‌های آبخوان همچون خصوصیات ذخیره‌سازی و پتانسیل زهکشی، درجه کارستی‌شدن و دیگر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی فراهم می‌کند (Bagheri et al. 2016). کوماک (Komac 2006)، با بررسی منحنی فرود چشمه‌های ماسیف کانین و حوضه بوویک بیان می‌دارد که فرود زیاد آبدهی چشمه‌ها نشانه‌ی تخلیه آب از مجاری بزرگ انحلالی در بستر تغذیه است. همچنین نشان می‌دهد که چشمه‌های بوکا، گلیجیون و گوریودا که از منطقه وادوز تخلیه می‌شود، در مقایسه با چشمه‌های زویکا و وودیکا که آب را از قسمت‌های انتشاری و پایین‌تر دریافت می‌کنند، میزان یونی کمتری را نشان می‌دهند. ودیعتی و همکاران (۱۳۹۴)، به بررسی چشمه کارستی پیرغار در جنوب غرب شهرستان فارسان پرداختند. با توجه به هیدروگراف و سه ضریب فرود تشکیل شده که در آن α_1 و α_2 نشان‌دهنده جریان سریع و α_3 نشان‌دهنده‌ی جریان پایدار یا افشان می‌باشد. α_1 نشان‌دهنده تخلیه سریع از مجاری کانالی و حفره‌ای، α_2 تخلیه از مجاری، شکستگی و درزه‌های ریز و α_3 نشان‌دهنده‌ی جریان افشان می‌باشد. براساس محاسبات، حدود ۶۰ درصد از جریان کل چشمه پیرغار به عنوان جریان سریع و مابقی آن به عنوان جریان پایه در نظر گرفته می‌شود. میرحسینی و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی منحنی فرود و تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی زاو در منطقه کلاله استان گلستان پرداختند. براساس ضریب فرود چشمه چنین استنباط می‌شود که این چشمه از یک بستر تکامل‌یافته‌ی کارستی تغذیه می‌شود و در این چشمه جریان سریع به جریان پایه غلبه دارد که این موضوع، بالا بودن توسعه‌ی کارست در حوضه‌ی آبرگیر این چشمه را نشان می‌دهد. روحتافی و همکاران (۱۳۹۵)، با مطالعه بر روی منحنی فرود

چشمه گورگور در استان اردبیل به این نتیجه دست یافتند که مقدار ضریب α_1 و α_2 در مرتبه‌ی 10^{-3} قرار دارند که نشان‌دهنده تخلیه از حفرات و درز و شکاف و شکستگی‌های ریز می‌باشد.

۲-۸-۱- تحلیل منحنی فرود چشمه‌های کارستی

هیدروژئولوژیست‌ها در تحقیقات خود چه در ایران از جمله کرمی ۱۳۷۲، کریمی ۱۳۸۰، کریمی‌وردنجان‌ی ۱۳۸۴، چیت‌سازان و همکاران ۱۳۸۷، شبان ۱۳۹۰ و چه در دنیا از جمله Raeisi and Karami 1997، Panagopoulos and Lambrakis 2006، Karimi et al. 2005، Dewandel et al. 2003، Bonacci 2001، Fleury et al. 2007، Fiorillo 2014، Bagheri et al. 2016 از تجزیه و تحلیل منحنی‌های فرود برای تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی چشمه‌های کارستی کمک گرفته‌اند. متداول‌ترین فرمول جهت توصیف یال نزولی هیدروگراف توسط مایلت (Maillet 1905) ارائه شده است.

فورد و ویلیامز (Ford and Williams 2007) با تجزیه و تحلیل‌های کمی مربوط به منحنی هیدروگراف نشان دادند که آبدهی چشمه تابعی از آب موجود در ذخیره سیستم می‌باشد و آن را با یک معادله‌ی ساده‌ی نمایی به صورت زیر بیان نمودند:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{معادله (۱-۲)}$$

اجزای این معادله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

Q_t آبدهی چشمه در زمان t بر حسب مترمکعب بر ثانیه، Q_0 آبدهی چشمه در زمان t_0 ، پایه‌ی لگاریتم طبیعی، α ضریب فرود و t مدت زمان بین دبی اولیه و ثانویه.

لگاریتم معادله (۱-۲)، محاسبه ضریب فرود α را فراهم می‌سازد.

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0.4343(t - t_0)\alpha \quad \text{معادله (۲-۲)}$$

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343(t - t_0)} \quad \text{معادله (۳-۲)}$$

میزان ضریب آلفا بیانگر توانایی تخلیه آب زیرزمینی است و نتیجه خصوصیات هیدرولوژیکی یعنی تخلخل مؤثر و ضریب قابلیت انتقال آبخوان است. وقتی مقدار ضریب آلفا کم باشد، منحنی فرود شیب کمتر اما مدت تخلیه بیشتری دارد. این منحنی دلالت بر بالا بودن ذخایر دینامیکی آبخوان دارد و اکثر این چشمه‌ها دائمی هستند. برعکس، وقتی میزان ضریب آلفا زیاد باشد، منحنی فرود دارای شیب تند است و ذخایر دینامیکی در این حالت موقتی بوده و تخلیه خیلی سریع صورت می‌گیرد لذا چنین چشمه‌هایی فصلی است (Samani 2001). طبق مطالعات صورت گرفته، میزان ضریب آلفا وابسته به خصوصیات هیدرولیکی و هندسی سیستم کارستی (Dewandel *et al.* 2003, Malvicini *et al.* 2005, Francesco 2011)، نوع و میزان تغذیه (Padilla *et al.* 1994)، نوع زهکشی (Kovacs *et al.* 2005) و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز (Lacey and Grayson 1998, Dewandel *et al.* 2003) است.

فصل سوم: مواد و روش‌ها

بررسی خصوصیات هیدروژنولوژیکی و هیدروژنوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب مجن به وسیله‌ی مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. به طور کلی در این تحقیق موارد زیر انجام شده است:

- جمع‌آوری آمار و اطلاعات هواشناسی و نقشه‌های زمین‌شناسی
 - بازدیدهای صحرایی و زمین‌شناسی به منظور بررسی ژئومورفولوژی کارست و تهیه و تکمیل نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
 - نمونه‌برداری ماهانه از چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه آب‌شناسی و زیست محیطی شاهرود
 - تجزیه شیمیایی عناصر اصلی در آزمایشگاه آب‌شناسی و زیست محیطی شاهرود
 - ارزیابی خصوصیات هیدروشیمیایی نمونه‌های آب چشمه‌ها و مطالعه کمی و کیفی با استفاده از داده‌ها و نتایج آنالیز شیمیایی
 - ترسیم حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن و تعیین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبرگیر
- در ادامه موارد ذکر شده به صورت جداگانه و به طور مختصر ارائه می‌شود.

۳-۱- جمع‌آوری آمار و اطلاعات

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژنولوژیکی و هیدروژنوشیمیایی چشمه‌های کارستی مجن اطلاعات زیر جمع‌آوری شد:

- جمع‌آوری آمار بارش و دمای مربوط به منطقه‌ی مجن از سازمان آب منطقه‌ای و هواشناسی شاهرود به منظور ترسیم نمودار بارش و ارتفاع منطقه
- مراجعه به سایت سازمان زمین‌شناسی و تهیه نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود
- مراجعه به سایت USGS و دریافت مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی سی متر برای ترسیم نمودار هیپسومتری

۳-۲- بازدیدهای صحرایی و زمین‌شناسی

جهت مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی مناطق مختلف، زمین‌شناسی منطقه بایستی دقیقاً مورد بررسی قرار گیرد که این امر به وسیله نقشه‌های زمین‌شناسی صورت می‌گیرد. بنابراین، جهت شناسایی منطقه مورد مطالعه، از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود استفاده شده است. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی شاهرود و بازدیدهای صحرایی صورت گرفته در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 ترسیم و رقومی گردید. همچنین بازدیدهای صحرایی به منظور بررسی ژئومورفولوژی کارست و تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌ها انجام شده است. در بررسی‌های ژئومورفولوژی کارست سعی شده است تا با ارزیابی درصد پوشش خاک، نوع بارش و عوارض کارستی، درصد تغذیه سالانه در منطقه مورد مطالعه برآورد شود و توسعه کارست در محدوده حوضه آبرگیر بررسی گردد.

۳-۳- نمونه‌برداری از چشمه‌ها

به منظور ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی از آن نمونه‌برداری به عمل می‌آید. از آنجایی‌که نمونه‌برداری از آب چشمه‌ها فرآیند بسیار مهمی بوده است، بنابراین در نمونه‌برداری از آب چشمه‌ها باید مواردی از قبیل محل نمونه‌برداری، نحوه برداشت نمونه، روش نگهداری و انتقال، فاصله‌ی بین نمونه‌برداری‌ها

تا انجام آزمایش مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به صورت ماهانه از چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ نمونه‌برداری شده است. در هر نمونه‌برداری از بطری‌های پلاستیکی مخصوص با حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتری استفاده شده است. هنگام نمونه‌برداری از چشمه، بطری پلاستیکی ۳ بار با آب چشمه شستشو داده شده است و سپس بطری‌ها به طور کامل با آب پر شده‌اند و حداکثر تا ۴۸ ساعت بعد مورد آزمایش قرار می‌گیرند.



شکل ۳-۱- محل نمونه‌برداری از چشمه‌ها

۳-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه‌ها

در محل نمونه‌برداری خصوصیات فیزیکی شامل دبی چشمه‌ها، درجه حرارت آب و خصوصیات شیمیایی شامل اسیدیت، هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده است. روش اندازه‌گیری این خصوصیات به طور مختصر ارائه می‌شود:

۳-۴-۱- اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها

دبی یکی از پارامترهای بسیار مهم برای مطالعات آب‌های سطحی و زیرزمینی است. منظور از دبی حجم آبی است که در واحد زمان از سطح مقطع عمود بر جریان عبور می‌کند. جهت اندازه‌گیری دبی از روش جسم شناور استفاده شده است. در این روش یک مسیر مستقیم و عاری از هرگونه گیاه یا جسم اضافه انتخاب می‌شود. یک جسم شناور مثل یک تکه چوب که بر روی آب شناور بماند انتخاب شده و در فاصله مشخص شده رها می‌گردد تا زمان رسیدن آن از ابتدا به انتهای مسیر تعیین شود. اگر فاصله زمانی t و فاصله دو نقطه x باشد، سرعت سطحی V_s از معادله (۳-۱) به دست می‌آید:

$$V_s = \frac{x}{t} \quad \text{معادله (۳-۱)}$$

رابطه بین سرعت سطحی و سرعت متوسط آب در مقطع کانال خطی است که با استفاده از معادله (۳-۲) محاسبه می‌شود:

$$V_a = k \cdot V_s \quad \text{معادله (۳-۲)}$$

ضریب k بستگی به ارتفاع آب در کانال دارد و مقدار آن بین $0/6$ تا $0/9$ متغیر است که معمولاً $0/8$ در نظر گرفته می‌شود (علیزاده ۱۳۸۰). چنانچه سرعت متوسط آب V_a و A سطح مقطع جریان باشد، مقدار آبدهی برابر است با:

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

۳-۴-۲- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

از مهمترین خصوصیات شیمیایی آب، هدایت الکتریکی می‌باشد زیرا با املاح جامد حل شده (TDS) در آب رابطه مستقیم دارد. جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (EC متر)

مدل WP-84 ساخت امریکا در محل نمونه برداری استفاده شده است. دقت این دستگاه بیشتر از ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی متر می باشد.

۳-۴-۳- اندازه گیری درجه حرارت

یکی از پارامترهای فیزیکی مهم در مطالعه چشمه های کارستی درجه حرارت آب می باشد. برای اندازه گیری این پارامتر از دماسنج جیوه ای با دقت اندازه گیری یک دهم درجه سانتی گراد استفاده شده است.

۳-۴-۴- اندازه گیری pH

مقدار pH به عواملی از قبیل مقدار کربن دی اکسید محلول در آب، درجه حرارت و مقدار آنیون های کربنات و بی کربنات وابسته است. اسیدیته آب چشمه ها در محل به وسیله ی دستگاه pH متر سانتکس (Suntex) مدل Sp-701 ساخت کشور تایوان اندازه گیری شده است. دقت این دستگاه برای اندازه گیری برابر با یک صدم واحد می باشد. به منظور کاهش میزان خطای اندازه گیری ابتدا الکتروود دستگاه با آب چشمه ها شسته شده و سپس مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۵- پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایشگاه

نمونه های برداشت شده از آب چشمه ها، جهت اندازه گیری آنیون ها و کاتیون های اصلی به آزمایشگاه آب شناسی و زیست محیطی دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل گردیدند. در آزمایشگاه کاتیون هایی مانند کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم، آنیون هایی مانند کربنات، بی کربنات، سولفات و کلر اندازه گیری شده است. سپس با استفاده از نتایج حاصله پارامترهایی مانند درصد خطای آزمایش، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم، سختی کل و قلیائیت اندازه گیری شده است.

۳-۵-۱- اندازه‌گیری آنیون‌ها

میزان یون کربنات و بی‌کربنات به ترتیب با شناساگرهای فنول فتالئین و متیل اورانژ به روش حجم‌سنجی (Titration) با اسید سولفوریک اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری یون کلر از طریق حجم‌سنجی با نیترات نقره ۰/۱ نرمال و شناساگر کرومات پتاسیم ۵ درصد انجام شده است. برای اندازه‌گیری مقدار یون سولفات از دستگاه Hanna مدل HI 93751 و معرف کلرید باریم استفاده شده است.

۳-۵-۲- اندازه‌گیری کاتیون‌ها

اندازه‌گیری غلظت یون کلسیم به روش حجم‌سنجی (Titration) با محلول EDTA یک صدم مولار و معرف مروکسید انجام شده است. برای اندازه‌گیری غلظت یون منیزیم، ابتدا مجموع یون کلسیم و منیزیم به روش حجم‌سنجی با معرف اریوکروم بلاک T اندازه‌گیری شده‌اند و سپس با کم کردن میزان یون کلسیم از مجموع کلسیم و منیزیم، مقدار یون منیزیم به دست آمده است. غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم محلول در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه نورسنج شعله‌ای (Flame photometer) و به کار بردن محلول‌های استاندارد سولفات سدیم و سولفات پتاسیم به دست آمده است.

۳-۵-۳- درصد خطای آزمایش

اندازه‌گیری غلظت عناصر با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی معمولاً با خطا همراه است. برای بررسی صحت این نتایج، از معادله درصد خطای آزمایش استفاده شده است:

$$\% \text{Error} = \frac{\sum \text{Cation} - \sum \text{Anion}}{\sum \text{Cation} + \sum \text{Anion}} \times 100 \quad \text{معادله (۳-۴)}$$

در این معادله $\sum \text{cation}$ و $\sum \text{anion}$ به ترتیب مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر و

Error٪/ خطای آزمایش می‌باشد. چنان‌چه خطا بیش از ۱۰ درصد باشد، خطای غیرمجاز تلقی می‌شود که ناشی از عدم صحت در سنجش و یا وجود عناصری می‌باشد که مورد سنجش قرار نگرفته‌اند.

۳-۵-۴- نسبت جذب سدیم

نسبت جذب سدیم یکی از پارامترهایی است که برای بیان مقدار سدیم موجود در آب مورد استفاده قرار می‌گیرد و از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad \text{معادله (۳-۵)}$$

در این معادله SAR بیانگر نسبت جذب سدیم می‌باشد، Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} غلظت کاتیون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌باشد.

۳-۵-۵- درصد سدیم

برای محاسبه‌ی درصد سدیم از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$\text{Na}\% = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}} \times 100 \quad \text{معادله (۳-۶)}$$

در این معادله، Na^+ ، Ca^{2+} ، K^+ و Mg^{2+} غلظت کاتیون‌های سدیم، کلسیم، پتاسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌باشد.

۳-۵-۶- سختی کل

برای محاسبه سختی کل از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$\text{TH} = 2.5[\text{Ca}] + 4.1[\text{Mg}] \quad \text{معادله (۷-۳)}$$

در این معادله، Ca و Mg به ترتیب غلظت کاتیون‌های کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و TH مقدار سختی کل بر حسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم می‌باشد.

۳-۵-۷-قلیائیت کل

برای محاسبه‌ی قلیائیت کل از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$A = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad \text{معادله (۸-۳)}$$

که در آن، A قلیائیت بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، CO_3^{2-} و HCO_3^- غلظت یون‌های کربنات و بی‌کربنات بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

۳-۵-۸-محاسبه ضرایب اشباع

اندیس‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت توسط نرم‌افزار PHREEQC اندازه‌گیری شده است. مقادیر بالای صفر برای اندیس اشباع، بیانگر شرایط فوق اشباع و مقادیر صفر و زیر صفر به ترتیب بیانگر شرایط اشباع و تحت اشباع می‌باشد.

۳-۵-۹-ترسیم نمودارهای هیدروشیمیایی

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل نمونه‌برداری و آزمایشگاه، نمودارهای کیفی از قبیل نمودار پایپر و استیف جهت تعیین تیپ آب و سیر تکامل هیدروژئوشیمیایی با استفاده از نرم‌افزار AQqa ترسیم گردید. همچنین نمودار شولر با استفاده از نرم‌افزار Excell ترسیم شده است.

۳-۶- تعیین محدوده حوضه آبخیز چشمه‌های غرب مجن

در این تحقیق با تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ژئومورفولوژی حوضه آبخیز منطقه مورد مطالعه به صورت مقدماتی ترسیم گردید و مساحت آن محاسبه شد. مقادیر بارش سالانه برای حوضه آبخیز از روش نمودار ارتفاع- بارش ایستگاه‌های مجاور تعیین گردید. همچنین درصد تغذیه سالانه با توجه به بازدیدهای صحرائی برآورد شده است. حجم تغذیه سالانه در حوضه آبخیز مقدماتی با توجه به مقادیر بارش سالانه، مساحت حوضه آبخیز و درصد تغذیه سالانه با استفاده از معادله (۳-۹) به دست آمده است.

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

حجم تخلیه سالانه از چشمه‌ها از طریق محاسبه‌ی حجم زیر هیدروگراف چشمه‌ها تعیین شد. در انتها با مقایسه مقادیر حجم تغذیه و تخلیه سالانه دقت ترسیم حوضه آبخیز مقدماتی بررسی و در صورت نیاز تصحیحاتی روی آن اعمال گردید.

۳-۶-۱- تعیین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبخیز منطقه مورد مطالعه

مهمترین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبخیز شامل مرز، مساحت و محیط، نیمرخ طولی آبراهه اصلی، شکل، ضریب انشعابات آبراهه‌ای، شیب متوسط، ارتفاع متوسط و زمان تمرکز حوضه می‌باشد. برای تعیین این خصوصیات از نقشه توپوگرافی منطقه، نرم‌افزارهای Google Earth، Arc GIS 10.3 و همچنین اطلاعات حاصل از بازدیدهای صحرائی استفاده شده است.

فصل چهارم: بررسی خصوصیات هیدروژنولوژیکی و هیدروژنوشیمیایی

چشمه‌های کارستی غرب مجن

همان‌طور که در فصل اول گفته شد، چشمه‌های کارستی مجن در جنوب آبشار مجن در مرز سنگ‌های آهکی کرتاسه بالایی و سازند لار با مارن‌ها و آهک‌های مارنی ایجاد شده‌اند. در این تحقیق، خصوصیات هیدروژنولوژیکی و هیدروژنوشیمیایی این چشمه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی تغییرات فیزیکی، تغییرات آبدهی و دما چشمه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مطالعاتی بر روی خصوصیات شیمیایی چشمه‌ها نظیر تغییرات غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی و نیز روند تغییرات هدایت الکتریکی صورت گرفته است.

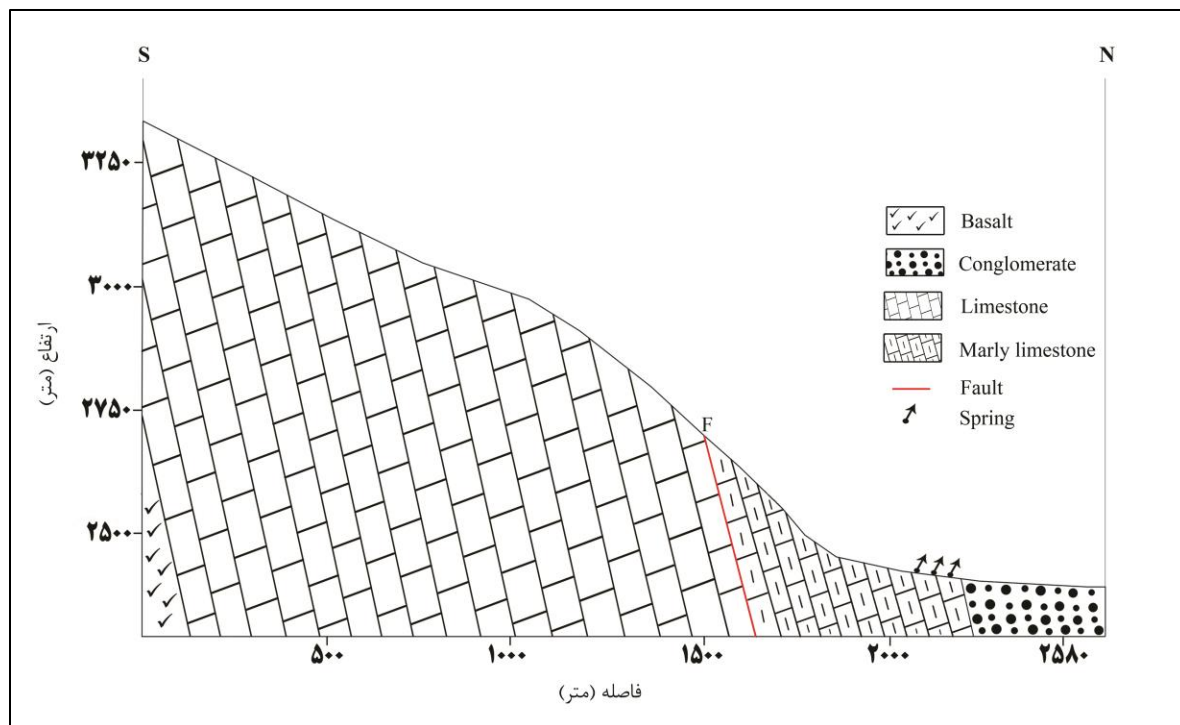
۴-۱- ارزیابی توسعه کارست براساس خصوصیات ژئومورفولوژیکی

فرآیند انحلال در سطح و در درون توده کارستی سبب ایجاد عوارض مهمی می‌شود. پدیده‌های ژئومورفولوژیکی ناشی از کارستی شدن سنگ‌ها، برای ارزیابی توسعه کارست در منطقه به کار گرفته می‌شوند. فراوانی و گسترش پدیده‌های مورفولوژیکی کارست نشان‌دهنده‌ی درجه توسعه کارست در منطقه می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که وجود یا عدم وجود هر یک از اشکال کارستی در یک منطقه می‌تواند راهنمایی برای شناخت بهتر و بیشتر سیستم کارستی منطقه باشد. در مناطق کارستی توسعه‌یافته اشکال سطحی کارست مانند فروچاله‌ها، گودی‌های مسدود و پلیه‌ها مشاهده می‌شوند و در مناطق کارستی توسعه‌نیافته این عوارض مهم مورفولوژیکی دیده نمی‌شوند.

در آبخوان کارستی منطقه مجن، دو عامل لیتولوژی و خصوصیات چینه‌شناسی سازندهای موجود در منطقه نقش مهمی در تشکیل آبخوان کارستی دارند. به این ترتیب که وجود آهک‌های ضخیم لایه و توده‌ای سازند لار و هم‌جهت بودن تقریبی شیب لایه‌بندی با شیب توپوگرافی نقش مهمی در تشکیل آبخوان کارستی منطقه دارد. بخش وسیعی از کارست منطقه از سنگ‌های برهنه تشکیل شده است. اما عوارض کارستی مورفولوژیکی معرف کارست‌های توسعه‌یافته از قبیل فروچاله‌ها، گودی‌های مسدود و پلیه‌ها مشاهده نمی‌شوند. چنین خصوصیتی بیانگر توسعه نسبتاً متوسط کارست در منطقه می‌باشد. در ادامه به بررسی پدیده‌های کارستی مشاهده شده در منطقه پرداخته می‌شود:

۴-۱-۱- چشمه‌های کارستی

چشمه‌های کارستی مهمترین عارضه هیدروژئولوژیکی گستره‌های کارستی را تشکیل می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی تخلیه آب زیرزمینی در سطح زمین هستند. به طور کلی در مناطق کارستی توسعه‌یافته کل آب سیستم معمولاً توسط یک چشمه بزرگ تخلیه می‌شود اما در مناطق کارستی توسعه‌نیافته تعداد چشمه‌ها زیاد و آبدهی آن‌ها کم می‌باشد. با توجه به بازدیدهای صحرایی انجام شده، چندین چشمه با آبدهی کم در منطقه مورد مطالعه مشاهده شده است که بیانگر توسعه نسبتاً متوسط کارست در منطقه می‌باشد. یکی از دلایل اصلی ظهور این چشمه‌ها، برخورد آب زیرزمینی حوضه کارستی این چشمه‌ها (سنگ‌های آهکی کرتاسه بالایی و سازند لار) با واحدهای غیرقابل نفوذ (مارن‌ها و آهک‌های مارنی) می‌باشد که مانع از حرکت رو به جلو آب زیرزمینی شده‌اند. به این ترتیب که برخورد جریان آب زیرزمینی با واحد غیرقابل نفوذ باعث بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و تشکیل چشمه‌های این منطقه شده است و به همین دلیل این چشمه‌ها از نوع چشمه‌های سرریزی (Overflow Springs) می‌باشند. شکل (۴-۱) موقعیت ساختاری چشمه‌های غرب مجن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- موقعیت ساختاری چشمه‌های غرب مجن

نمایی از چشمه‌های منطقه مورد مطالعه در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.

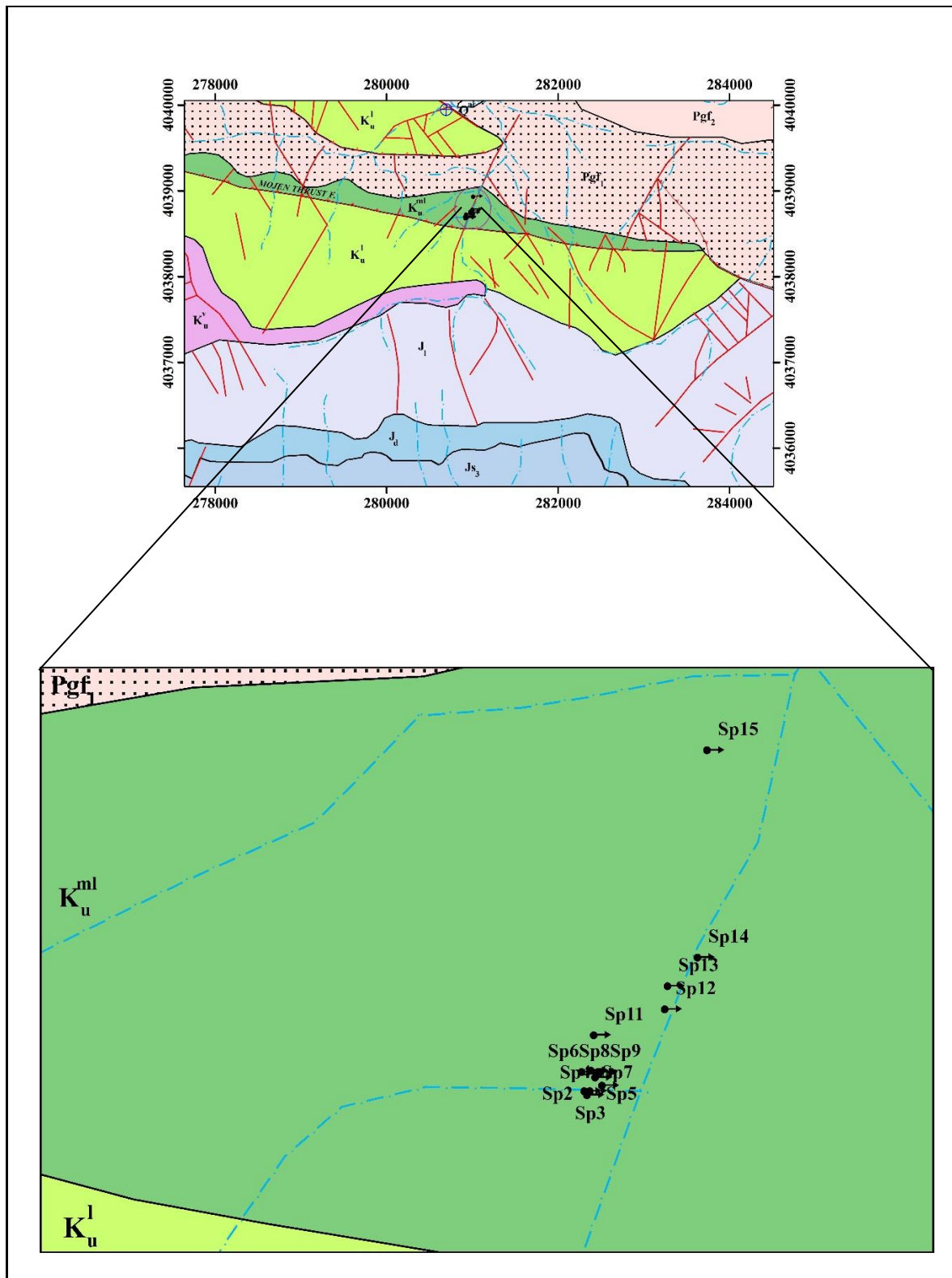


شکل ۴-۲- نمایی از چشمه‌های غرب مجن

در جدول (۴-۱) موقعیت جغرافیایی و ارتفاع چشمه‌های غرب مجن نشان داده شده است. سپس موقعیت چشمه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 ترسیم شده است و در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱- موقعیت جغرافیایی و ارتفاع چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

ارتفاع (متر)	UTM _y	UTM _x	نام چشمه
۲۴۵۳	۴۰۳۸۶۸۰	۲۸۰۹۳۰	Sp ₁
۲۴۵۴	۴۰۳۸۶۸۷	۲۸۰۹۱۹	Sp ₂
۲۴۵۱	۴۰۳۸۶۸۸	۲۸۰۹۳۰	Sp ₃
۲۴۵۰	۴۰۳۸۶۸۹	۲۸۰۹۳۶	Sp ₄
۲۴۴۸	۴۰۳۸۶۹۵	۲۸۰۹۳۲	Sp ₅
۲۴۴۶	۴۰۳۸۷۰۳	۲۸۰۹۱۸	Sp ₆
۲۴۴۵	۴۰۳۸۷۰۱	۲۸۰۹۳۷	Sp ₇₋₁₀
۲۴۴۱	۴۰۳۸۷۲۹	۲۸۰۹۲۴	Sp ₁₁
۲۴۳۱	۴۰۳۸۷۴۸	۲۸۰۹۷۶	Sp ₁₂
۲۴۲۵	۴۰۳۸۷۶۶	۲۸۰۹۸۹	Sp ₁₃
۲۴۲۲	۴۰۳۸۷۸۰	۲۸۱۰۰۰	Sp ₁₄
۲۳۹۴	۴۰۳۸۶۸۷	۲۸۱۰۰۷	Sp ₁₅



شکل ۴-۳- موقعیت چشمه‌های کارستی غرب مجن

۴-۱-۲- سنگ‌های برهنه

سنگ‌های برهنه یکی از پدیده‌های مهم نواحی کارستی هستند. با توجه به اقلیم منطقه و شیب توپوگرافی زیاد در منطقه پوشش خاک بر روی سطوح سنگی وجود ندارد به همین دلیل سنگ‌های برهنه در منطقه رخنمون دارند که نقش قابل توجهی در افزایش تغذیه سالانه آبخوان کارستی را شامل می‌شود. شکل (۴-۴) نمایی از سنگ‌های برهنه را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴- نمایی از سنگ‌های برهنه

۴-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های غرب مجن، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی شامل آبدهی، هدایت الکتریکی و دما به صورت ماهانه از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ اندازه‌گیری شده‌اند.

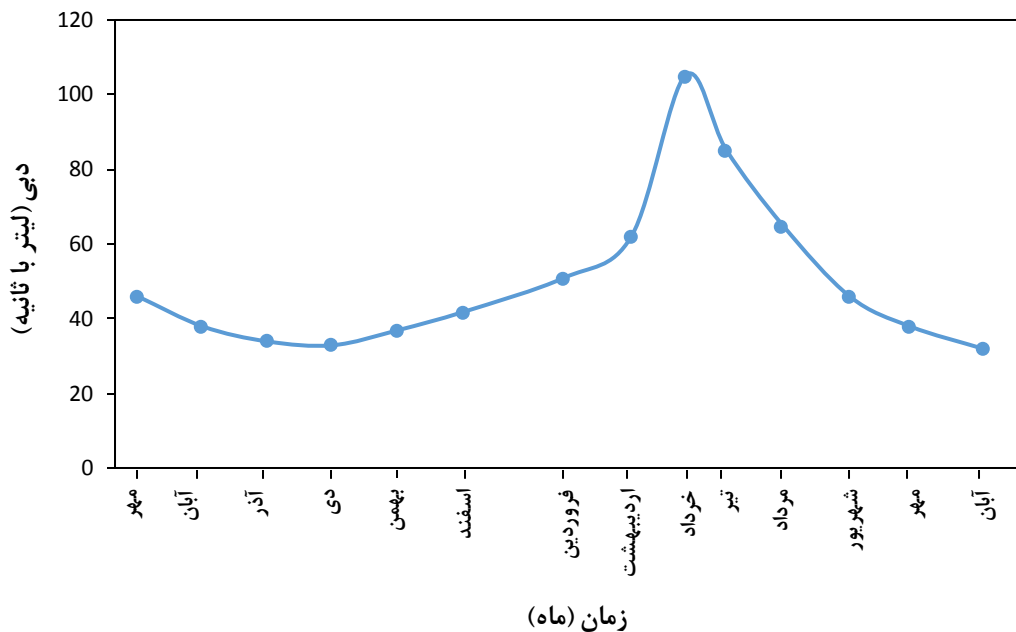
جدول (۲-۴) مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این قسمت به منظور تفسیر خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها از دو پارامتر آدهی و درجه حرارت آب استفاده شده است.

جدول ۲-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل نمونه‌برداری چشمه‌های غرب مجن

pH	درجه حرارت آب (درجه سانتی‌گراد)	هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	مجموع دبی چشمه‌ها (لیتر بر ثانیه)	تاریخ نمونه‌برداری
-	۸/۳	۲۱۵	۴۶	۱۳۹۵/۷/۱۰
-	۸/۲	۲۱۶	۳۸	۱۳۹۵/۸/۱۰
-	۸/۰	۲۱۷	۳۴	۱۳۹۵/۹/۱۰
-	۷/۸	۲۱۸	۳۳	۱۳۹۵/۱۰/۱۰
-	۷/۹	۲۱۶	۳۷	۱۳۹۵/۱۱/۱۰
-	۸/۰	۲۱۲	۴۲	۱۳۹۵/۱۲/۱۱
-	۸/۲	۲۰۸	۵۱	۱۳۹۶/۱/۲۸
-	۸/۴	۲۰۷	۶۲	۱۳۹۶/۲/۲۸
۷/۶۳	۸/۶	۲۱۲	۱۰۵	۱۳۹۶/۳/۲۲
۷/۷۹	۸/۶	۲۱۳	۸۵	۱۳۹۶/۴/۱۰
۷/۷۵	۸/۵	۲۱۶	۶۵	۱۳۹۶/۵/۵
۷/۶۴	۸/۵	۲۱۹	۴۶	۱۳۹۶/۶/۵
۷/۸۰	۸/۴	۲۲۰	۳۸	۱۳۹۶/۷/۲
۷/۸۵	۸/۴	۲۱۷	۳۲	۱۳۹۶/۸/۶
-	۸/۳	۲۱۵	۵۱	میانگین
-	۰/۲۶	۴	۲۱	انحراف معیار
-	۳/۱	۱/۸	۴۱	ضریب تغییرات (/.)

۴-۲-۱- تغییرات زمانی دبی چشمه‌ها

تغییرات زمانی دبی چشمه‌های کارستی یکی از پارامترهای مهم و اصلی برای ارزیابی نوع جریان در آبخوان‌های کارستی تغذیه‌کننده چشمه‌ها می‌باشد. هیدروگراف مجموع دبی چشمه‌ها براساس داده‌های دبی جدول (۴-۲) از مهرماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ ترسیم شده است (شکل ۴-۵). لازم به ذکر است که چون خروجی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه به صورت متعدد و در فاصله‌ی نزدیک به هم واقع شده است، بنابراین اندازه‌گیری دبی این چشمه‌ها به صورت جداگانه امکان‌پذیر نیست و به همین دلیل مجموع دبی آن‌ها در پایین دست چشمه‌ها اندازه‌گیری شده است.



شکل ۴-۵- هیدروگراف چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶

همان‌طور که در این هیدروگراف ملاحظه می‌شود دبی چشمه‌ها از ۳۳ لیتر بر ثانیه در دی ماه تا ۱۰۵ لیتر بر ثانیه در خرداد ماه تغییر می‌کند. با توجه به جدول (۴-۲) میانگین مقادیر دبی چشمه‌ها ۵۱ لیتر بر ثانیه

و انحراف معیار ۲۱ و ضریب تغییرات آن‌ها ۴۱ درصد است. با توجه به ضریب تغییرات دبی چشمه‌ها و همچنین عدم وجود عوارض ژئومورفولوژیکی مهم معرف کارست‌های توسعه‌یافته (مانند فروچاله‌ها، گودی‌های مسدود، پلایه‌ها) در حوضه آبرگیر چشمه‌ها، سیستم غالب جریان در این چشمه‌ها از نوع افشان می‌باشد. اگرچه ضریب تغییرات ۴۱ درصد برای دبی بیانگر سیستم جریان افشان است، یکی از دلایل ایجاد چنین ضریب تغییراتی، شیب بسیار بالای حوضه و کوچک بودن حوضه آبرگیر می‌باشد. به این ترتیب که اگر حوضه آبرگیر چشمه کشیده و با شیب کمتر بود، به احتمال قوی ضریب تغییرات دبی از مقدار فوق‌الذکر به مراتب کمتر به دست می‌آمد.

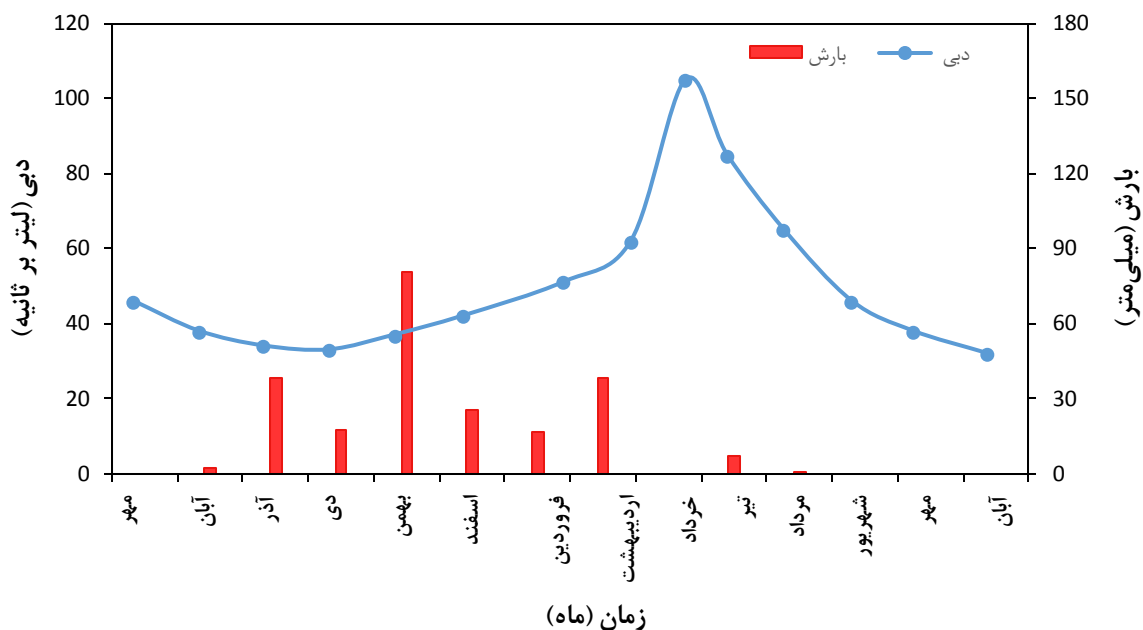
رابطه دبی و بارش

به منظور بررسی تغییرات دبی و بارش چشمه‌های مورد مطالعه، نمودار تغییرات این پارامترها با توجه به جدول (۴-۳) به طور همزمان ترسیم شده است (شکل ۴-۶). با توجه به شکل (۴-۶) از آنجایی که بارندگی‌های آبان تا دی ماه بیشتر به صورت برف می‌باشد دبی چشمه‌ها به طور تدریجی تا دی ماه کاهش می‌یابد. در ادامه با ذوب شدن برف فصل زمستان و بارندگی‌های اردیبهشت ماه دبی چشمه افزایش یافته و در اواخر خرداد ماه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. فیزیوگرافی حوضه و وسعت آن و همچنین شیب حوضه عواملی هستند که زمان تمرکز آب در آبخوان را کنترل می‌کنند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بین انتهای بارش مؤثر و حداکثر دبی یک اختلاف زمانی تقریباً یک ماهه وجود دارد که علت اصلی این اختلاف زمانی، نوع بارش است. با توجه به اینکه بارندگی در این منطقه غالباً به صورت برف است و مدتی طول می‌کشد تا این برف‌ها ذوب گردند این تأخیر زمانی بین حداکثر بارش و حداکثر دبی به وجود آمده است. همچنین قسمتی از این تأخیر به دلیل سیستم جریان افشان در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بدین صورت که در چشمه‌ها با سیستم جریان افشان، شبکه کارستی به خوبی توسعه‌نیافته و آب‌های زیرزمینی نیاز به زمان

بیشتری برای جابه‌جایی در آبخوان دارند. بنابراین، در هیدروگراف چشمه‌ها با جریان افشان، دبی اوج هیدروگراف چشمه‌ها پس از یک تأخیر زمانی نسبت به بارش رخ می‌دهد.

جدول ۳-۴- داده‌های دبی و بارش منطقه مورد مطالعه

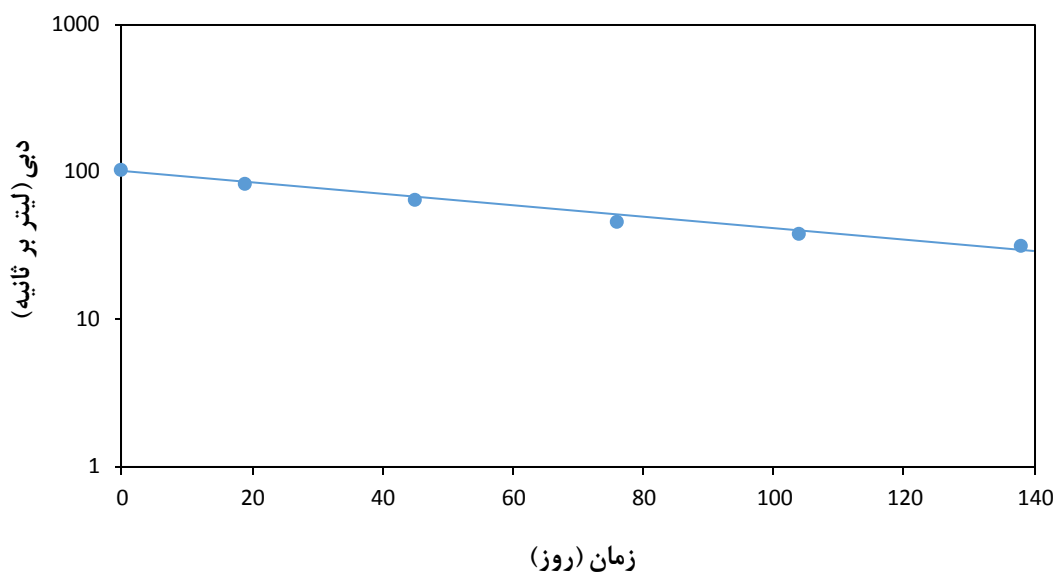
زمان (ماه)	دبی (لیتر بر ثانیه)	بارش (میلی‌متر)
مهر	۴۶	۰
آبان	۳۸	۲/۵
آذر	۳۴	۳۸/۰
دی	۳۳	۱۷/۵
بهمن	۳۷	۸۱/۰
اسفند	۴۲	۲۵/۵
فروردین	۵۱	۱۷/۰
اردیبهشت	۶۲	۳۸/۵
خرداد	۱۰۵	۰
تیر	۸۵	۷/۵
مرداد	۶۵	۱/۰
شهریور	۴۶	۰
مهر	۳۸	۰
آبان	۳۲	۰



شکل ۴-۶- تغییرات زمانی دبی و بارش چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶

۴-۲-۲- ارزیابی و تحلیل ضریب منحنی فرود

تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه‌های کارستی، یکی از روش‌های عملی برای تعیین رژیم جریان افشان یا مجرای می‌باشد و به کمک آن می‌توان ضرایب بده و حجم ذخیره دینامیکی را محاسبه نمود. ضریب بده (α) بیانگر توانایی آبخوان در ذخیره‌سازی آب زیرزمینی است. این ضریب تابعی از تخلخل مؤثر و قابلیت انتقال آبخوان می‌باشد. جهت تعیین ضریب بده (α) ، منحنی فرود چشمه‌ها (Recession curve) ترسیم شده است. در واقع این منحنی شاخه نزولی هیدروگراف چشمه‌ها می‌باشد که دبی بر روی محور عمودی با مقیاس لگاریتمی در مقابل زمان بر روی محور افقی با مقیاس عددی ترسیم می‌گردد. شکل (۴-۷) منحنی فرود چشمه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-۷) ملاحظه می‌شود که منحنی فرود چشمه‌ها دارای یک شیب می‌باشند. شیب خط ایجاد شده به عنوان ضریب بده (α) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴-۷- منحنی فرود چشمه‌های غرب مجن از مهرماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶

به منظور محاسبه ضریب بده (α) از معادله‌ی مایلت (Maillet 1905) استفاده شده است:

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

در این معادله، Q_t آبدهی چشمه‌ها در زمان t بر حسب مترمکعب بر ثانیه، Q_0 آبدهی چشمه در زمان شروع فروکش، e پایه‌ی لگاریتم طبیعی، α ضریب بده و t مدت زمان بین دبی اولیه و ثانویه می‌باشد. شکل لگاریتمی معادله (۱-۴) به صورت زیر می‌باشد:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343(t - t_0)} \quad \text{معادله (۲-۴)}$$

هنگامی که منحنی فرود دارای شیب کم باشد، تخلیه ذخیره دینامیکی آبخوان به کندی انجام می‌شود و چشمه‌های این نوع آبخوان اکثراً دائماً هستند. برعکس وقتی که ضریب بده (α) زیاد باشد، منحنی فرود دارای شیب تند بوده و ذخایر دینامیکی در این حالت موقتی بوده و خیلی سریع تخلیه می‌شود. به طور کلی هنگامی که ضریب بده (α) در مرتبه‌ی (10^{-2}) قرار داشته باشد، نشان‌دهنده‌ی زهکشی سریع از شکستگی‌ها و مجاری کارستی می‌باشد و هنگامی که این ضریب کوچکتر باشد (مرتبه‌ی 10^{-3}) نشان‌دهنده‌ی تخلیه از

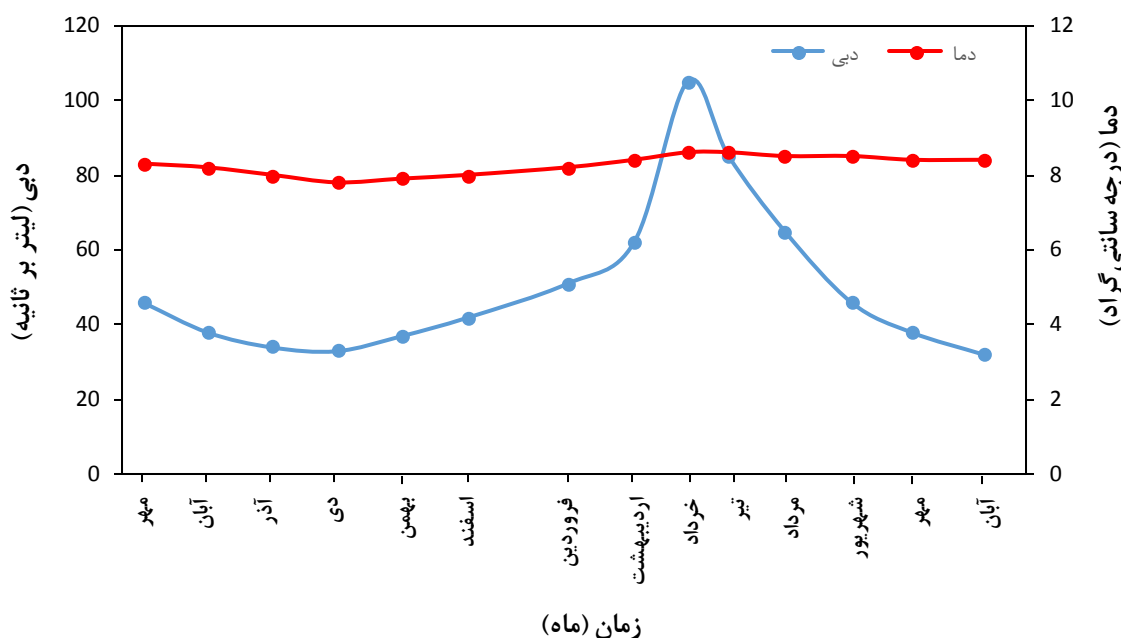
حفرات و درزه و شکستگی‌های کوچک می‌باشد (Milanovic 1981). براساس محاسبات انجام شده، ضریب بده (α) چشمه‌های غرب مجن در طول دوره فرود ۱۳۸ روزه حدوداً برابر با ۰/۰۰۹ می‌باشد که بیانگر تخلیه از درزه و شکاف و شکستگی‌های کوچک می‌باشد و همچنین بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب بده (α) بدست آمده که تا اندازه‌ای نسبت به سیستم‌های افشان بالا می‌باشد به شیب بسیار بالای حوضه و همچنین کوچک بودن وسعت حوضه مربوط می‌شود.

۴-۲-۳- تغییرات زمانی درجه حرارت آب

درجه حرارت آب یکی دیگر از معیارهای مهم برای تفکیک جریان‌های افشان و مجرای در کارست می‌باشد. درجه حرارت چشمه‌ها با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد در مظهر چشمه‌ها اندازه‌گیری شده است. ضریب تغییرات درجه حرارت در چشمه‌هایی که سیستم تغذیه‌کننده چشمه از نوع افشان است بسیار اندک می‌باشد. با توجه به جدول (۲-۴) میانگین مقادیر دمای آب چشمه‌ها ۸/۳ درجه سانتی‌گراد و انحراف معیار و ضریب تغییرات آن‌ها به ترتیب ۰/۲۶ و ۳/۱ درصد است. اندک بودن ضریب تغییرات درجه حرارت در چشمه‌های مورد مطالعه، نتیجه بدست آمده درباره سیستم غالب تغذیه‌کننده در این چشمه‌ها (سیستم افشان) که با استفاده از مقدار ضریب بده حاصل شده است، را مورد تأیید قرار می‌دهد.

رابطه دما و دبی

به منظور تعیین ارتباط بین دبی و درجه حرارت آب چشمه‌ها، نمودار تغییرات آن با استفاده از داده‌های جدول (۲-۴) ترسیم شده است (شکل ۸-۴). با توجه به شکل (۸-۴) ملاحظه می‌شود که با توجه به تغییرات دبی، تغییرات دما بسیار ناچیز بوده است که احتمالاً مربوط به خطای اندازه‌گیری یا تأثیر دمای محیط اطراف چشمه می‌باشد.



شکل ۴-۸- تغییرات زمانی دبی و دما چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶

۴-۳- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها

خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها به منظور تعیین منشأ تغذیه، تشخیص نوع سیستم جریان در چشمه‌ها و کیفیت آب چشمه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها مانند تغییرات غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی پرداخته می‌شود. در نهایت، کیفیت آب چشمه‌ها با رسم نمودارهای کیفی آب (پایپر، استیف و شولر) مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

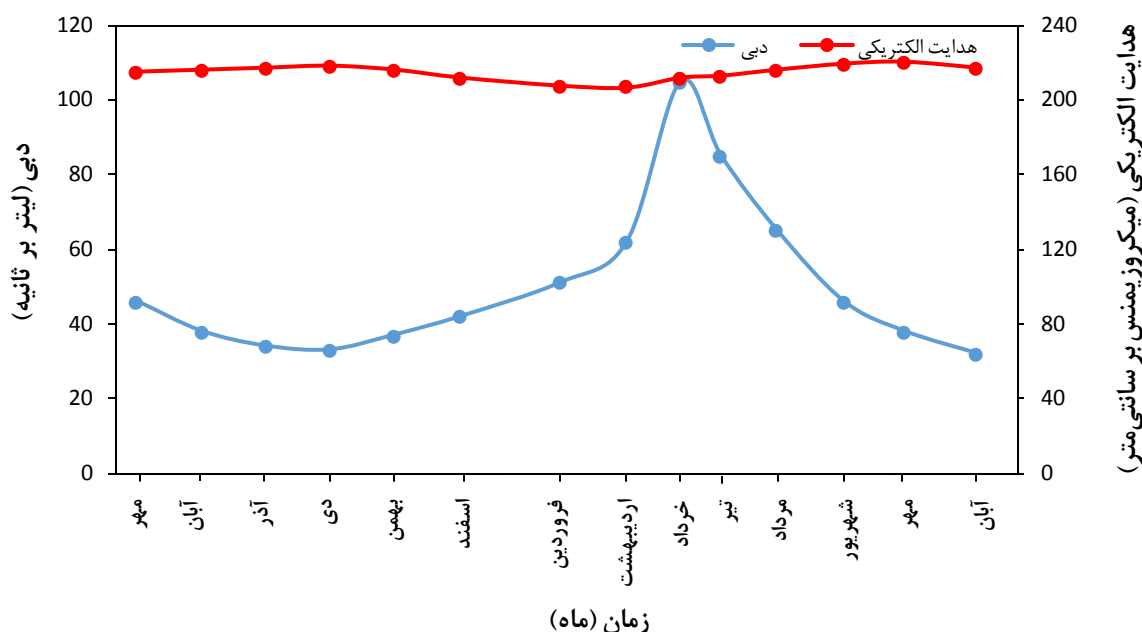
۴-۳-۱- تغییرات زمانی هدایت الکتریکی

مقادیر هدایت الکتریکی چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه سال ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ در مظهر چشمه‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج بدست آمده در جدول (۴-۲) ارائه شده است. به منظور بررسی تغییرات هدایت الکتریکی در چشمه‌های مورد مطالعه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات این پارامتر در طول دوره

آماری محاسبه شده‌اند. با توجه به جدول (۴-۲) میزان تغییرات هدایت الکتریکی بسیار ناچیز است، به این ترتیب که میانگین مقادیر هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها ۲۱۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، انحراف معیار ۴ و ضریب تغییرات آن‌ها ۱/۸ درصد است. با مقایسه این ضریب تغییرات و ضریب تغییرات مربوط به سیستم‌های کارستی افشان و مجرایبی که به ترتیب کمتر و بیشتر از ۵ درصد می‌باشد ملاحظه می‌شود که در این چشمه‌ها سیستم غالب جریان، سیستم افشان می‌باشد.

رابطه هدایت الکتریکی و دبی

هدایت الکتریکی آب و روند تغییرات آن همواره نشان‌دهنده زمان ماندگاری آب در سفره آب زیرزمینی و جنس آبخوان می‌باشد. با افزایش زمان ماندگاری آب درون سفره، هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد که به دلیل فراهم بودن زمان لازم برای انحلال مواد آبخوان درون آب زیرزمینی است. در رژیم‌های مختلف آبدهی، سرعت جریان آب زیرزمینی متفاوت بوده و در نتیجه زمان ماندگاری آب در آبخوان در حالت‌های گوناگون با یکدیگر تفاوت دارد. یکی از پارامترهایی که معمولاً تغییرات آن را با روند هدایت الکتریکی مقایسه می‌کنند، آبدهی چشمه است. در چشمه‌ها بایستی با افزایش آبدهی و کاهش زمان ماندگاری آب زیرزمینی درون آبخوان از مقدار هدایت الکتریکی کاسته شود. با توجه به جدول (۴-۲) نمودار هدایت الکتریکی و آبدهی چشمه‌ها به طور همزمان ترسیم شده است (شکل ۴-۹). با توجه به شکل (۴-۹) ملاحظه می‌گردد که تغییرات هدایت الکتریکی (EC)، کم و بیش با تغییرات دبی هماهنگ می‌باشد، بدین صورت که با افزایش دبی، روند کاهشی خیلی ضعیفی در تغییرات هدایت الکتریکی مشاهده می‌شود. همچنین با توجه به این روند کاهشی خیلی ضعیف، می‌توان بیان نمود که تغییرات هدایت الکتریکی بسیار ناچیز بوده و این نوسانات ناچیز هم به دلیل خطای اندازه‌گیری و شرایط محیطی می‌باشد.



شکل ۴-۹- تغییرات زمانی دبی و هدایت الکتریکی چشمه‌های غرب مجن از مهرماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶

۴-۳-۲- غلظت یون‌های اصلی

غلظت یون‌های اصلی در آب‌های زیرزمینی به عواملی از قبیل زمان ماندگاری آب در بخش‌های مختلف آبخوان، جنس آبخوان، نوع سیستم جریان و مسافت طی شده از محل تغذیه تا تخلیه بستگی دارد. در فاصله زمانی مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶، ۱۴ بار از چشمه‌های مورد مطالعه نمونه‌برداری شده است و سپس با توجه به تغییرات ناچیز هدایت الکتریکی، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی چشمه‌های مورد مطالعه طی دو دوره (خرداد ماه ۱۳۹۶ و مهر ماه ۱۳۹۶) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه آب چشمه‌ها جهت تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه آب‌شناسی و زیست محیطی دانشگاه صنعتی شاهرود انتقال یافته است. نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب در جدول (۴-۴) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به دلیل تغییرات ناچیز هدایت الکتریکی، تغییرات غلظت یون‌های اصلی نیز ناچیز می‌باشد. همچنین درصد خطای آزمایش برای نمونه‌های برداشت شده، کمتر از ۵ درصد بوده که بیانگر دقت مورد نیاز در آزمایش‌های مربوطه می‌باشد.

جدول ۴-۴- غلظت یون‌های اصلی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

درصد خطای آزمایش	غلظت یون‌ها (میلی اکی‌والان بر لیتر)						نام چشمه	تاریخ نمونه‌برداری
	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		
۰/۵۰	۰/۴۲	۱/۷۰	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۶۰	۱/۵۰	SP ₄	۱۳۹۶/۳/۲۲
۰/۷۰	۰/۴۵	۱/۷۰	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۶۰	۱/۵۰	SP ₁₃	
۱/۴۶	۰/۴۸	۱/۷۵	۰/۴۰	۰/۳۸	۰/۶۰	۱/۵۰	SP ₁₅	
۰/۸۷	۰/۴۷	۱/۸۰	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۶۰	۱/۶۰	SP ₄	۱۳۹۶/۷/۲
۰/۶۷	۰/۴۸	۱/۸۰	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۶۰	۱/۶۰	SP ₁₃	
۱/۱۳	۰/۴۹	۱/۸۲	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۶۰	۱/۶۰	SP ₁₅	

۴-۴- بررسی مقادیر پارامترهای محاسبه شده

با توجه به غلظت یون‌های اصلی، پارامترهایی از قبیل نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg)، قلیائیت (Alkalinity)، سختی کل (Total Hardness)، درصد سدیم (Na%)، نسبت جذب سدیم (SAR) برای تمام نمونه‌ها محاسبه شده است و در جدول (۴-۵) نمایش داده شده است. در ادامه به بررسی این پارامترها پرداخته می‌شود.

جدول ۴-۵- پارامترهای محاسبه شده

Na%	SAR	Alkalinity (mg/l)	Ca/Mg (epm)	Total Hardness (mg/l as CaCO ₃)	نام چشمه	تاریخ نمونه‌برداری
۱۳/۲۰	۰/۳۱	۱۰۳/۷۰	۲/۵۰	۱۰۴/۵۰	SP ₄	۱۳۹۶/۳/۲۲
۱۴/۳۰	۰/۳۴	۱۰۳/۷۰	۲/۵۰	۱۰۴/۵۰	SP ₁₃	
۱۵/۳۰	۰/۳۷	۱۰۶/۸۰	۲/۵۰	۱۰۴/۵۰	SP ₁₅	
۱۳/۴۰	۰/۳۲	۱۰۹/۸۰	۲/۷۰	۱۰۹/۵۰	SP ₄	۱۳۹۶/۷/۲
۱۴/۷۰	۰/۳۶	۱۰۹/۸۰	۲/۷۰	۱۰۹/۵۰	SP ₁₃	
۱۵/۰۵	۰/۳۷	۱۱۱/۰۰	۲/۷۰	۱۰۹/۵۰	SP ₁₅	

۴-۴-۱- نسبت کلسیم به منیزیم

استفاده از نسبت‌های یونی روش مناسبی برای تعیین منشأ کاتیون و آنیون‌های محلول در آب هستند. نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم در سفره‌های کارستی، شاخص بسیار مناسبی برای تشخیص آبخوان‌های کارستی آهکی از آبخوان‌های کارستی دولومیتی می‌باشد. به طور کلی نسبت‌های نزدیک به یک مربوط به آبخوان‌های کارستی دولومیتی بوده و نسبت‌های بین دو تا ده مربوط به آبخوان‌های کارستی آهکی می‌باشند (White 1988, Langmuir 1971). هر چه نسبت کلسیم به منیزیم بیشتر باشد سنگ آهک خالص‌تر است (Karami 2002). برای محاسبه این پارامتر، غلظت‌های دو کاتیون کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول (۴-۵) ملاحظه می‌گردد که میانگین نسبت کلسیم به منیزیم برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده برابر با $2/60$ می‌باشد، در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که جنس آبخوان در حوضه آبگیر چشمه‌های مورد مطالعه، عمدتاً آهکی می‌باشد.

۴-۴-۲- قلیائیت

با توجه به جدول (۴-۵) مقادیر قلیائیت برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده در خرداد ماه بین $103/7$ تا $106/8$ میلی‌گرم بر لیتر و در مهر ماه بین $109/8$ تا $111/0$ میلی‌گرم بر لیتر متغیر می‌باشد که بیانگر تغییرات ناچیز این پارامتر در طی دو دوره نمونه‌برداری می‌باشد.

۴-۴-۳- سختی کل

سختی آب به غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم در آب وابسته می‌باشد و معمولاً بر حسب میلی‌گرم بر لیتر بیان و محاسبه می‌شود. سختی آب به دو گروه تقسیم می‌شود، سختی کربناته و سختی غیر کربناته. سختی کربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم است که با آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات ترکیب می‌شوند.

سختی غیر کربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم می‌شود که با آنیون‌هایی غیر از کربنات و بی‌کربنات ترکیب شده‌اند (برای مثال آنیون‌های سولفات و کلر). در مطالعه سختی آب معمولاً این دو نوع سختی (سختی کربناته و غیر کربناته) از یکدیگر تفکیک نمی‌شوند و به صورت مجموع محاسبه می‌شوند که به آن سختی کل گفته می‌شود. با توجه به مقادیر سختی کل نمونه‌های آب چشمه‌های مجن (جدول ۴-۵) ملاحظه می‌شود که میانگین مقادیر سختی کل برای دو دوره نمونه‌برداری برابر با ۱۰۷ محاسبه شده است، بنابراین با توجه به طبقه‌بندی تاد (Todd 1980) که یکی از روش‌های رایج برای تعیین نوع آب براساس سختی کل می‌باشد، نمونه‌های برداشت شده از چشمه‌های مورد مطالعه در رده آب‌های نسبتاً سخت قرار می‌گیرند.

جدول ۴-۶- طبقه‌بندی آب‌ها براساس سختی کل (Todd 1980)

گروه	۱	۲	۳	۴
میزان سختی کل	کمتر از ۷۵	۷۵-۱۵۰	۱۵۰-۳۰۰	بیشتر از ۳۰۰
نوع آب	نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت

۴-۴-۴- درصد سدیم و نسبت جذب سدیم

سدیم یکی از یون‌هایی است که به لحاظ کیفیت آب آبیاری بسیار حائز اهمیت است. چنان‌چه غلظت سدیم زیاد باشد، خواص فیزیکی خاک از قبیل نفوذپذیری، زهکشی و تهویه خاک به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کنند که این تغییرات بر روی رشد گیاهان تأثیر می‌گذارد. به منظور بیان مقدار سدیم موجود در آب آبیاری از دو پارامتر درصد سدیم و نسبت جذب سدیم استفاده می‌شود. میانگین مقدار نسبت جذب سدیم طبق جدول (۴-۵) برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده در خرداد ماه و مهر ماه به ترتیب برابر با ۰/۳۴ و ۰/۳۵

می‌باشد. همچنین میانگین مقدار درصد سدیم نیز طبق جدول (۴-۵) برای نمونه‌های مورد مطالعه در طی دو دوره نمونه‌برداری بین ۱۴/۲۷ تا ۱۴/۳۸ متغیر می‌باشد که بیانگر تغییرات ناچیز این پارامترها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

۴-۴-۵- محاسبه‌ی شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت

محاسبه شاخص‌های اشباع کانی‌های مختلف جهت توصیف تکامل شیمیایی آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. شاخص‌های اشباع کانی‌های کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت برای نمونه‌های آب چشمه‌های مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC محاسبه شده است و نتایج به دست آمده در جدول (۴-۷) ارائه شده است. با توجه به جدول (۴-۷) در تمامی موارد ضریب اشباع مربوط به کانی‌های کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت منفی می‌باشد. فقط در مهر ماه ضریب اشباع مربوط به کانی کلسیت به صورت جزئی مثبت بوده و آب چشمه‌ها نسبت به این کانی فوق اشباع می‌باشد. مقادیر شاخص اشباع کانی کلسیت برای چشمه‌های مورد مطالعه بسیار به حالت اشباع نزدیک می‌باشد و کانی‌های دولومیت، ژپس و هالیت به ترتیب دارای مقادیر شاخص اشباع منفی تری بوده که تحت اشباع بودن آب چشمه‌ها برای این کانی‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به وجود سازند آهکی در منطقه مورد مطالعه، می‌توان تغییرات شاخص اشباع کلسیت را توجیه نمود.

جدول ۴-۷- میانگین شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت برای چشمه‌های مورد مطالعه

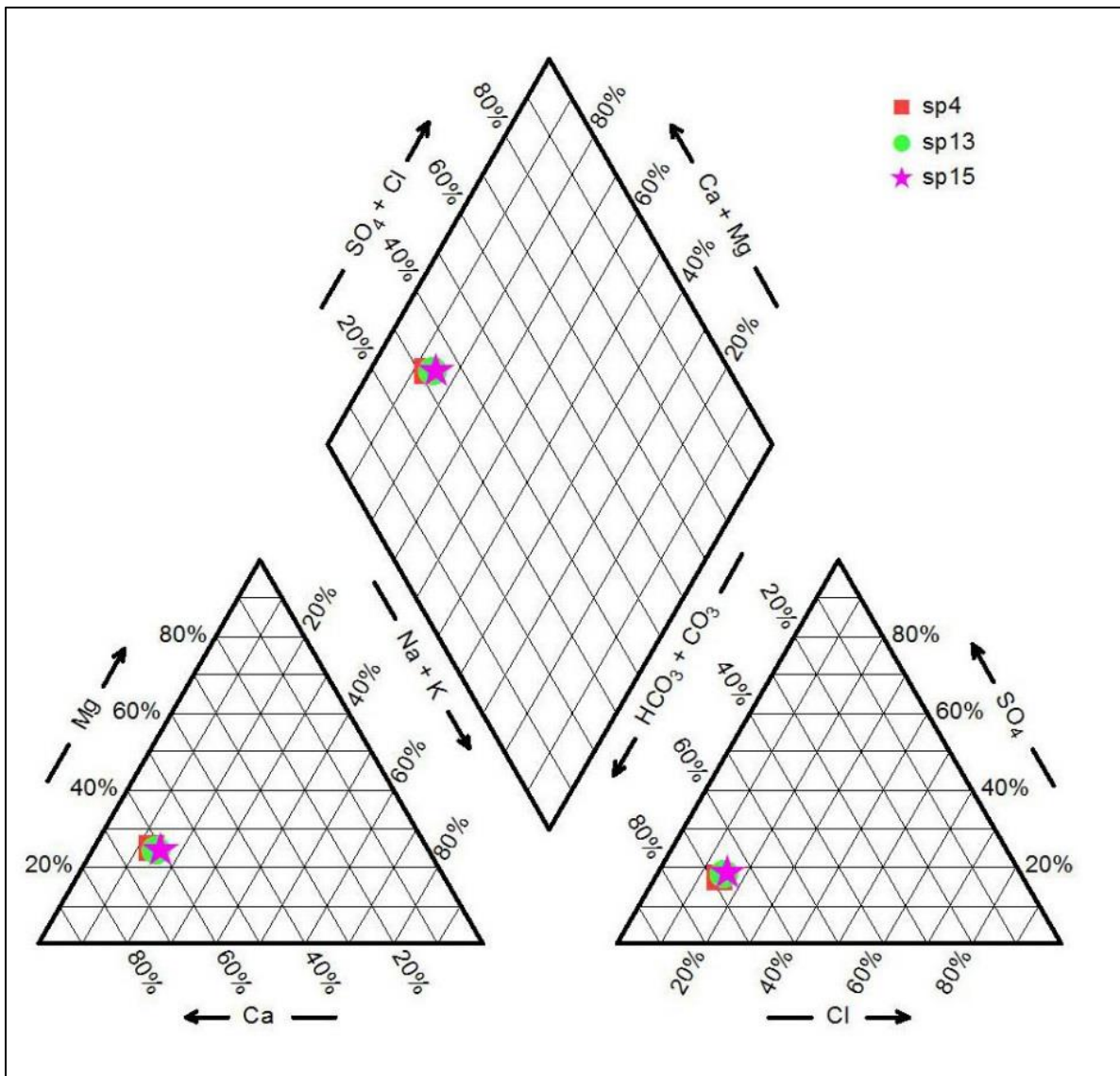
SI _h	SI _g	SI _d	SI _c	تاریخ نمونه‌برداری
-۶/۹۵	-۲/۴۹	-۰/۳۹	-۰/۰۶	۱۳۹۶/۳/۲۲
-۶/۹۱	-۲/۴۵	-۰/۲۴	۰/۰۲	۱۳۹۶/۷/۲

۴-۵- نمودارهای هیدروشیمیایی

از نمودارهای هیدروشیمیایی جهت نمایش کیفی نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه و تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی استفاده می‌شود. در این مطالعه، جهت تعیین رخساره‌ها و بررسی منشأ نمونه آب از نمودارهای پایپر، استیف و شولر استفاده می‌شود.

۴-۵-۱- نمودار پایپر

یکی از کاربردی‌ترین نمودارهایی که جهت بررسی تیپ آب مورد استفاده قرار می‌گیرد نمودار 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. همچنین نمودار پایپر عمدتاً جهت تعیین تیپ آب، انحلال یا رسوبگذاری، اختلاط نمونه‌های آب و تبادل یونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمودار پایپر از ترکیب سه میدان مجزا تشکیل شده است. درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میدان‌های مثلثی و موقعیت ترکیبی آن‌ها در میدان لوزی شکل نشان داده می‌شود. این نمودار با استفاده از نرم‌افزار AQQA ترسیم شده است. شکل (۴-۱۰) نمودار پایپر مربوط به نمونه آب چشمه‌های مورد مطالعه در خرداد ماه سال ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد. با توجه به موقعیت قرارگیری نمونه‌های آب چشمه‌ها در نمودار پایپر مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌ها دارای کلسیم و بی‌کربنات بالایی می‌باشند و آب‌هایی با سختی موقت هستند. براساس این نمودار تمام نمونه‌ها دارای سختی کربناته بیش از ۵۰ درصد هستند و در آن‌ها غلبه با اسیدهای ضعیف و عناصر قلیایی خاکی می‌باشد و تمام نمونه‌ها در محدوده خاص آب‌های کارستی واقع شده‌اند.

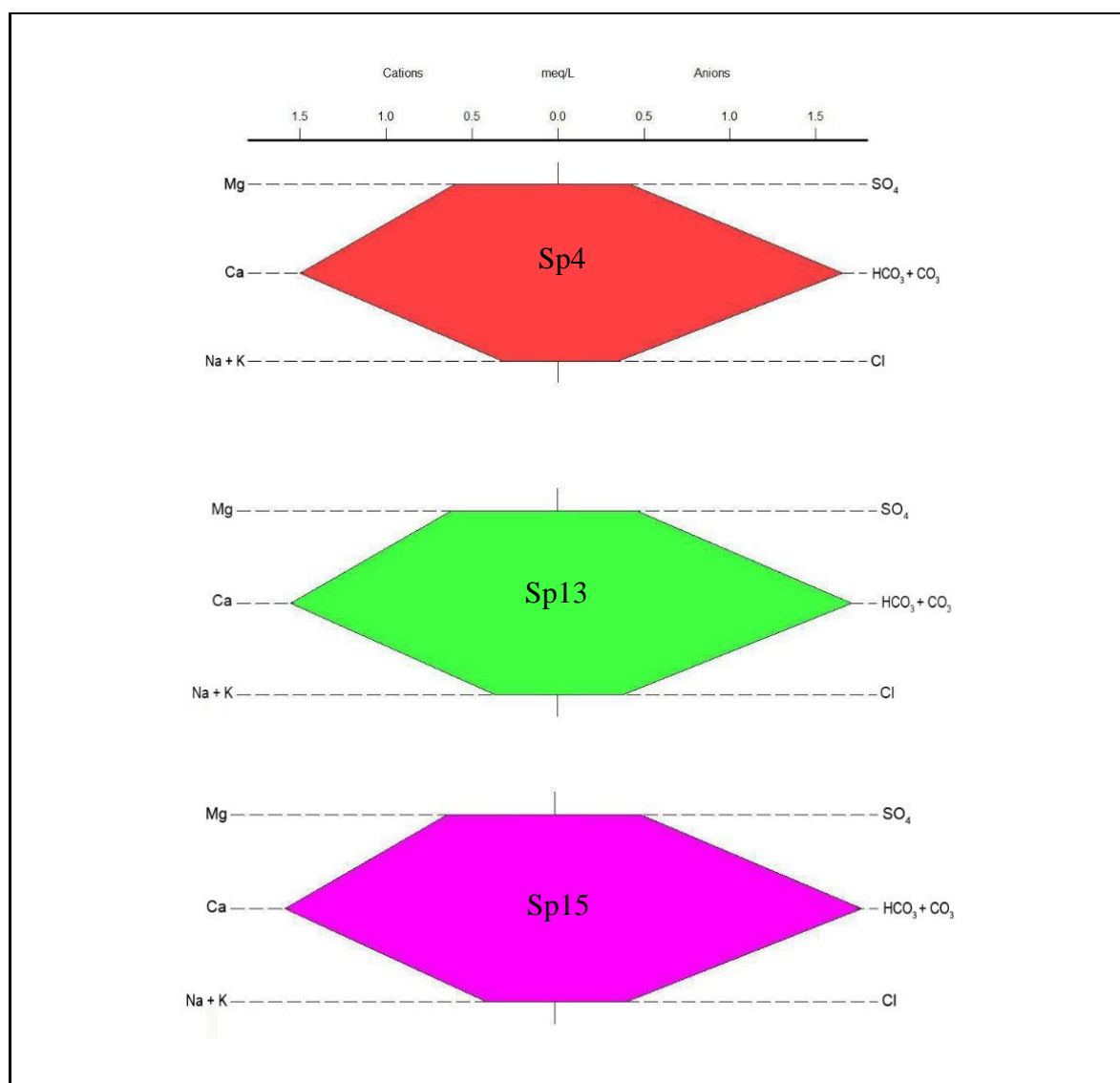


شکل ۴-۱۰- نمودار پایپر چشمه‌های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶

۴-۵-۲- نمودار استیف

استفاده از نمودار استیف، روش مناسبی جهت تعیین تیپ آب و مقایسه سریع و آسان ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب و همچنین تشخیص سنگ منشأهای مختلف می‌باشد. نمودار استیف از چهار محور افقی موازی تشکیل شده است که یک محور با مقدار صفر آن‌ها را قطع می‌کند. مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر هستند و سطح این نمودار نشان‌دهنده‌ی مقدار کل مواد جامد محلول

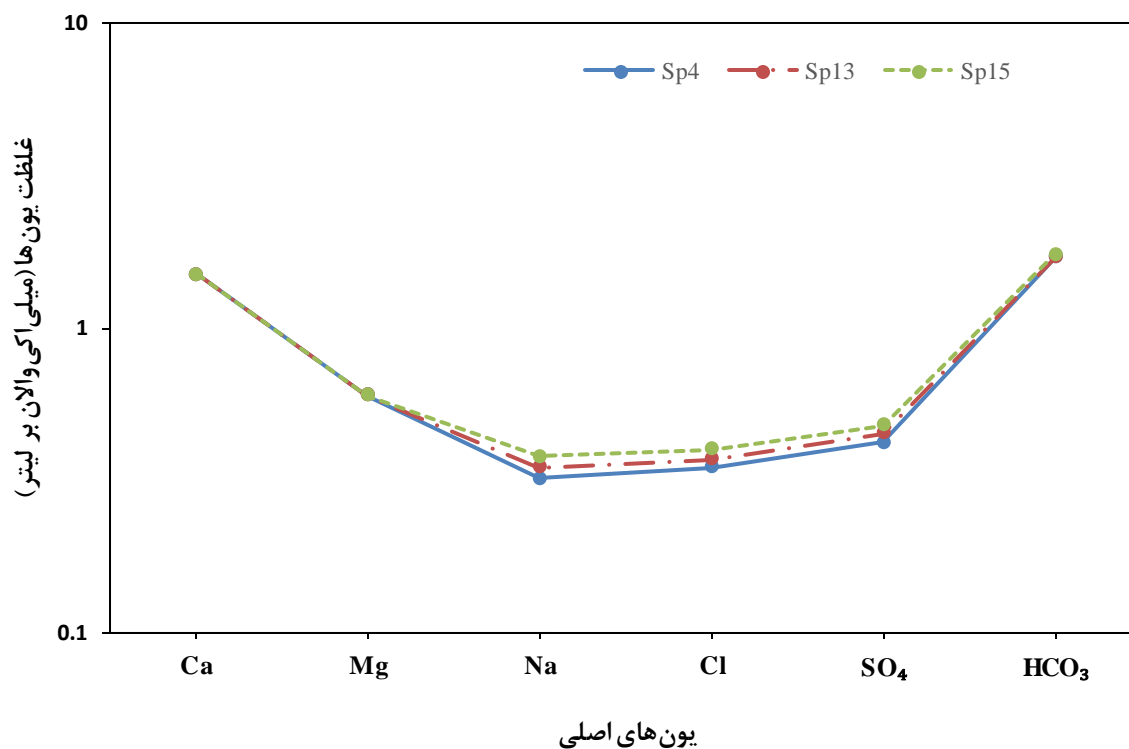
در آب می باشد. نمودار استیف آب چشمه های مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار AQQA ترسیم شده است و در شکل (۴-۱۱) ارائه شده است. با توجه به نمودار استیف، تمام چشمه های مورد مطالعه دارای تیپ بی کربناته و رخساره کلسیک می باشند که با لیتولوژی آهکی منطقه مطابقت دارند. همچنین الگو نمونه ها هم شبیه به یکدیگر بوده و تیپیک آب های کارستی می باشند.



شکل ۴-۱۱- نمودار استیف چشمه های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶

۴-۵-۳- نمودار شولر

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. این نمودار نیمه لگاریتمی است که بر روی محور افقی آن یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر، سولفات و بی‌کربنات و بر روی محور عمودی آن غلظت این یون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر قرار گرفته است. اگر نمونه‌های آب در این نمودار به صورت موازی هم قرار گیرند نشانگر یکی بودن منشأ و مساوی بودن نسبت یون‌ها در نمونه است (Todd and Mays 2005). شکل (۴-۱۲) نمودار شولر چشمه‌های مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به شکل (۴-۱۲) تمام نمونه‌ها دارای روند یکسانی می‌باشند که بیانگر منشأ یکسان آن‌ها می‌باشد.



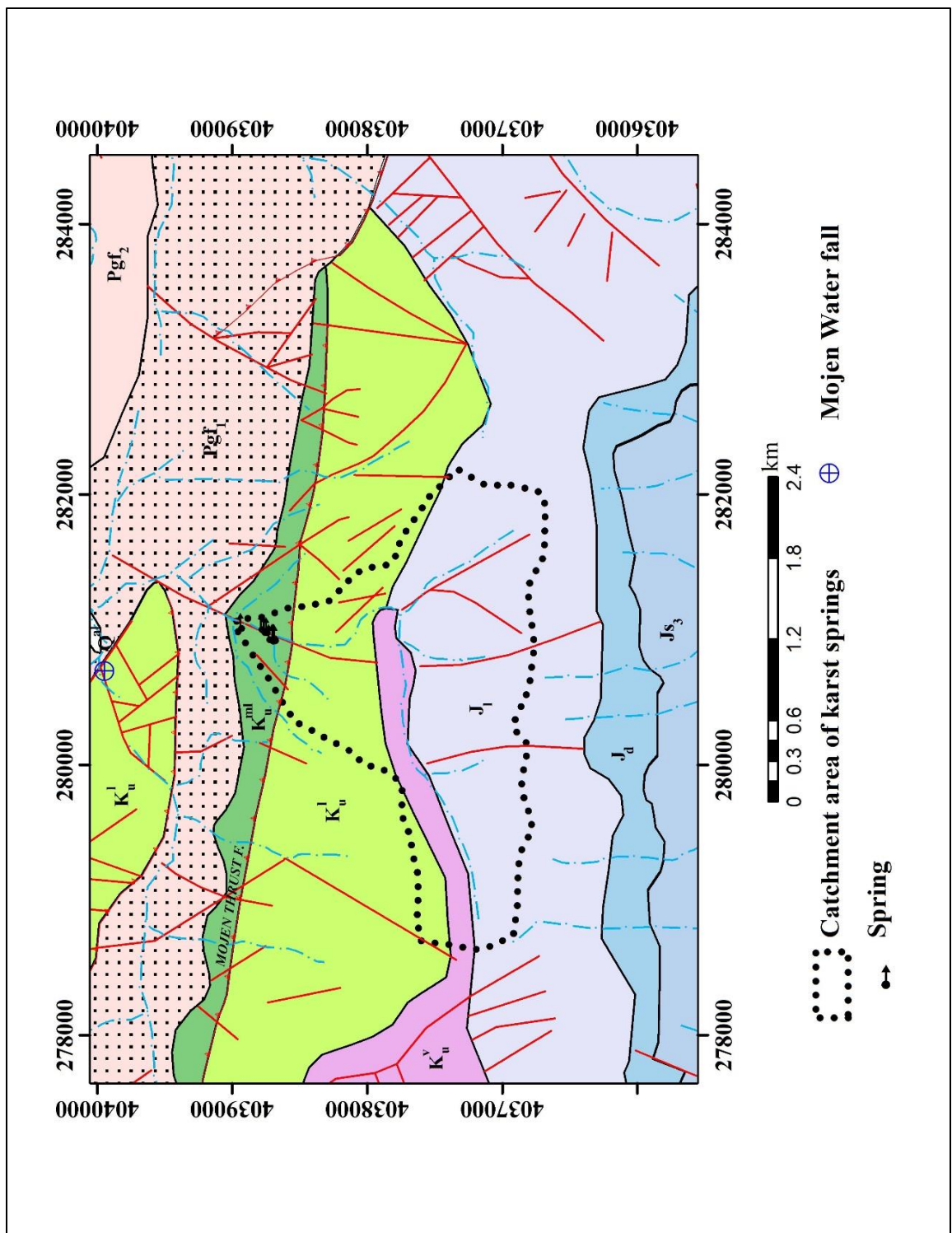
شکل ۴-۱۲- نمودار شولر چشمه‌های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶

۴-۶- تعیین حوضه آبخیز چشمه کارستی مجن

مساحت و وضع هندسی آبخوان‌های کارستی و مساحت حوضه آبخیز چشمه‌ها بسته به شرایط هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی در زمان و مکان تغییر می‌کند، بنابراین در مناطق کارستی، تعیین دقیق محدوده حوضه آبخیز چشمه‌ها و برآورد مرزهای آن یکی از پارامترهای بسیار دشوار و پیچیده می‌باشند. حوضه آبخیز ناحیه‌ای است که تمام نقاط روی این حوضه در رساندن آب به نقطه خروجی یا چشمه سهیم می‌باشند (Bonacci and Andric 2015). در این بخش، مساحت و مرزهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز چشمه‌ها به صورت تقریبی و با استفاده از روش‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی تعیین شده است. برای تعیین حوضه آبخیز از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در این مطالعه با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، از روش بیلان (مقایسه حجم‌های تغذیه و تخلیه) استفاده شده است. به منظور تعیین حوضه آبخیز مراحل زیر انجام شده است:

۴-۶-۱- ترسیم مقدماتی حوضه آبخیز

به منظور تعیین حوضه آبخیز چشمه‌ها، از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و هیدروژئولوژی استفاده گردید. به این ترتیب که منطقه آهکی واقع در بالادست چشمه‌ها که شیب لایه‌بندی آن به سمت چشمه‌ها می‌باشد و همچنین به لحاظ هیدرولیکی امکان انتقال آب این منطقه به چشمه‌ها وجود دارد، مشخص شد. محدوده اولیه حوضه آبخیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه و مشاهدات صحرائی به کمک نرم‌افزارهای Google Earth و Arc GIS 10.3 به صورت مقدماتی ترسیم شده است. شکل (۴-۱۳) نقشه حوضه آبخیز ترسیم شده را در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 نشان می‌دهد. براساس محدوده‌ی مشخص شده، مساحت حوضه آبخیز چشمه‌ها حدود ۴/۲۷ کیلومتر مربع برآورد شده است.



شکل ۴-۱۳- نقشه حوضه آبریز مقدماتی چشمه‌های غرب مچن

۴-۶-۲- صحت‌سنجی حوضه آبرگیر مقدماتی با استفاده از روش بیلان

به منظور بررسی حوضه آبرگیر از روش بیلان استفاده می‌شود و با مقایسه حجم تغذیه و تخلیه در منطقه مورد مطالعه، صحت حوضه آبرگیر ترسیم شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا برای محدوده حوضه آبرگیر، مقدار میانگین ارتفاع از روی منحنی هیپسومتری تعیین شده است. سپس با توجه به میانگین ارتفاع بدست آمده و با استفاده از نمودار ارتفاع- بارش ایستگاه‌های مجاور منطقه مورد مطالعه، میانگین بارش سالانه حوضه آبرگیر مورد نظر انتخاب گردید. درصد تغذیه سالانه در حوضه آبرگیر با توجه به معیارهای مختلف (مانند توسعه کارست، نوع بارش غالب، شیب توپوگرافی، درصد سنگ‌های برهنه و ..) برآورد شد. سپس با داشتن مقادیر بارش، درصد تغذیه سالانه و مساحت حوضه آبرگیر ترسیم شده، حجم تغذیه سالانه حوضه آبرگیر مقدماتی محاسبه شد. علاوه بر این، حجم تخلیه سالانه چشمه‌ها نیز از طریق محاسبه‌ی حجم زیر هیدروگراف بدست آمد. با مقایسه‌ی حجم تغذیه و تخلیه سالانه، دقت حوضه آبرگیر ترسیم شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

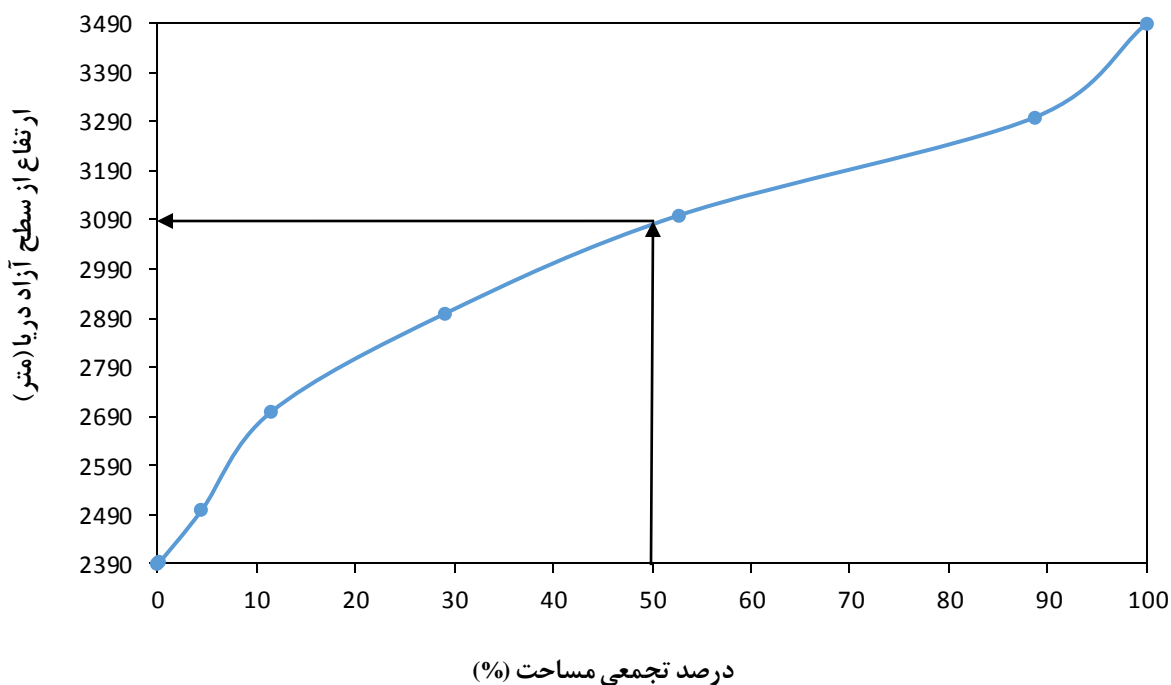
الف- ارزیابی ارتفاع متوسط در حوضه آبرگیر مقدماتی

ارتفاع متوسط حوضه، ارتفاعی است که ۵۰ درصد از مساحت اراضی حوضه ارتفاعی بالاتر از آن و ۵۰ درصد باقیمانده مساحت حوضه ارتفاعی پایین‌تر از آن داشته باشند (علیزاده ۱۳۸۰). جهت تعیین ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با تفکیک مکانی سی متر استفاده گردید. همچنین به منظور آنالیز مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه از نرم‌افزار Arc GIS 10.3 استفاده شده است. با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه، حداقل ارتفاع در منطقه ۲۳۹۰ متر و حداکثر ارتفاع ۳۵۸۰ متر تشخیص داده شده است. به منظور تعیین ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر مورد مطالعه، ابتدا نمودار هیپسومتری حوضه آبرگیر ترسیم شده، سپس ارتفاع مربوط به ۵۰ درصد مساحت به عنوان ارتفاع متوسط

حوضه در نظر گرفته می‌شود. برای ترسیم این نمودار، خطوط ارتفاعی محدوده‌ی مورد مطالعه در دسته‌بندی‌های ۲۰۰ متری تهیه شده و سپس مساحتی از حوضه که بین خطوط ارتفاعی واقع شده، اندازه‌گیری می‌شود. جدول (۴-۸) داده‌های هیپسومتری گروه‌های ارتفاعی را در حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی غرب مجن نشان می‌دهد. با استفاده از اطلاعات این جدول، نمودار هیپسومتری حوضه آبرگیر چشمه‌های مورد مطالعه ترسیم شده است. شکل (۴-۱۴) نمودار هیپسومتری حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن را نشان می‌دهد. بر طبق این نمودار، ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن برابر با ۳۰۹۰ متر برآورد شده است.

جدول ۴-۸- داده‌های هیپسومتری گروه‌های ارتفاعی حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن

محدوده‌ی ارتفاعی (متر)	ارتفاع متوسط (متر)	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت (%)	درصد مساحت تجمعی (%)
۲۳۹۰ - ۲۴۰۰	۲۳۹۵	۰/۰۱	۰/۲۳	۰/۲۳
۲۴۰۰ - ۲۶۰۰	۲۵۰۰	۰/۱۸	۴/۲۱	۴/۴۴
۲۶۰۰ - ۲۸۰۰	۲۷۰۰	۰/۳۰	۷/۰۳	۱۱/۴۷
۲۸۰۰ - ۳۰۰۰	۲۹۰۰	۰/۷۵	۱۷/۵۷	۲۹/۰۴
۳۰۰۰ - ۳۲۰۰	۳۱۰۰	۱/۰۱	۲۳/۶۵	۵۲/۶۹
۳۲۰۰ - ۳۴۰۰	۳۳۰۰	۱/۵۴	۳۶/۰۷	۸۸/۷۶
۳۴۰۰ - ۳۵۸۰	۳۴۹۰	۰/۴۸	۱۱/۲۴	۱۰۰
مجموع	-	۴/۲۷	۱۰۰	-



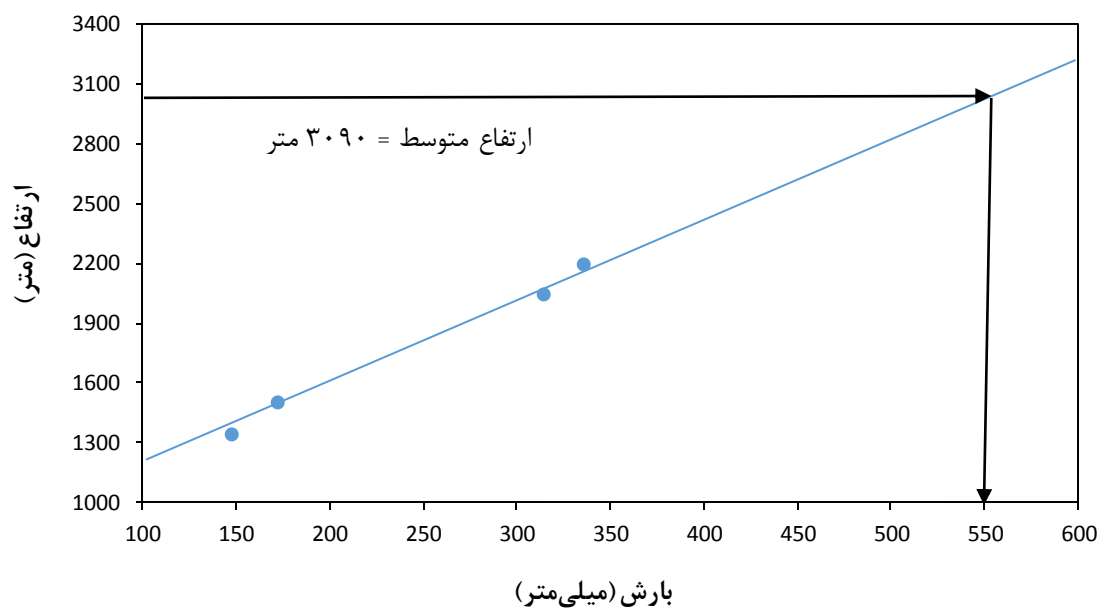
شکل ۴-۱۴- منحنی هیپسومتری حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن

ب- برآورد میانگین بارش در محدوده‌ی تعیین شده

به منظور تعیین مقدار بارش در حوضه آبرگیر چشمه‌ها، از آمار و اطلاعات سال‌های مشترک ایستگاه‌های مجن، تاش، شاهرود و دامغان استفاده شده است. جدول (۴-۹) موقعیت ایستگاه‌های ذکر شده را نشان می‌دهد. با استفاده از مقادیر بارندگی سال‌های مشترک در هر چهار ایستگاه و ارتفاع آن‌ها، نمودار ارتفاع-بارش منطقه ترسیم شده است (شکل ۴-۱۵). با توجه به این نمودار، همبستگی بالایی بین میانگین بارش سالانه و ارتفاع در هر چهار ایستگاه دیده می‌شود. از آنجایی که ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن برابر با ۳۰۹۰ متر می‌باشد، میانگین بارش سالانه برای حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن با توجه به این نمودار، ۵۵۰ میلی‌متر برآورد شده است.

جدول ۴-۹- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی اطراف حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن

ارتفاع (متر)	موقعیت جغرافیایی		میانگین بارندگی ۱۱ ساله (میلی‌متر)	نام ایستگاه	ردیف
	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی			
۲۰۵۰	۵۴-۳۹-۰۱	۳۶-۲۸-۳۷	۳۱۵/۰۷	مجن	۱
۲۲۰۰	۵۴-۲۲-۰۰	۳۰-۰۰-۰۰	۳۳۵/۸۰	تاش	۲
۱۳۴۵	۵۵-۰۰-۰۰	۳۶-۲۱-۰۰	۱۴۷/۸۰	شاهرود	۳
۱۵۰۰	۵۴-۵۸-۵۷	۳۶-۲۸-۱۲	۱۷۱/۹۵	بسطام	۴



شکل ۴-۱۵- نمودار ارتفاع- بارش ایستگاه‌های مجاور حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن

ج- تعیین درصد تغذیه سالانه برای حوضه آبرگیر مقدماتی

درصد تغذیه به عوامل متعددی از قبیل شدت، میزان و نوع نزولات جوی، سیستم درزه‌ها، گسترش بارندگی، درصد پوشش خاک، شیب توپوگرافی و وجود یا عدم وجود فروچاله‌ها بستگی دارد (کریمی‌وردجانی ۱۳۸۹).

درصد تغذیه با استفاده از بازدیدهای صحرایی از منطقه و نظر کارشناسی تخمین زده شده است. با توجه به اطلاعات جدول (۴-۱۰) که در حوضه آبخیز چشمه‌های سالدوران، امام‌قیس، شش‌پیر، آب‌مراد، شیخ‌علیخان، هیزمی‌خارتوران، آهنگران، سرانی، گاماسیاب، قلقل (دشت بو دامغان)، چشمه علی دامغان، چشمه‌های پالنگان و روانسر در کوه‌های شاهو کردستان استفاده شده است، درصد تغذیه سالانه در محدوده‌ی حوضه‌ی آبخیز چشمه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه ۰/۶۸ برآورد شده است. بنابراین با توجه به درصد تغذیه سالانه در این منطقه، حدود ۳۷۴ میلی‌متر از کل بارش‌های منطقه (۵۵۰ میلی‌متر) به درون آبخوان چشمه نفوذ کرده است.

جدول ۴-۱۰- جدول برآورد درصد تغذیه سالانه در کارست

عوامل مؤثر	میزان	امتیاز	انتخابی	عوامل مؤثر	میزان	امتیاز	انتخابی
وضعیت اپی‌کارست (درصد سنگ‌های برهنه)	< ۲۵ ۲۵-۵۰ ۵۰-۷۵ > ۷۵	۱-۴ ۴-۷ ۷-۱۰ ۱۰-۱۳	۸	مقدار بارش	< ۲۵۰ ۲۵۰-۵۰۰ ۵۰۰-۷۵۰ > ۷۵۰	۱-۴ ۴-۷ ۷-۱۰ ۱۰-۱۳	۱۲
عوارض مهم کارستی بلعنده آب	کارن‌های بزرگ کارن‌های نیمه‌عمق کارن‌های کم‌عمق کارن‌های اولیه	۱-۴ ۴-۷ ۷-۱۰ ۱۰-۱۳	۱۱	نوع بارش	< ۲۵ ۲۵-۵۰ ۵۰-۷۵ > ۷۵	۱-۴ ۴-۷ ۷-۱۰ ۱۰-۱۳	۷
وجود گودی مسدود و سطوح گسترده در بام کوهستان	< ۲۵ ۲۵-۵۰ ۵۰-۷۵ > ۷۵	۱-۳ ۳-۵ ۵-۷ ۷-۹	۸	سهم دامنه‌های رو به شمال و شمال شرق	< ۲۵ ۲۵-۵۰ ۵۰-۷۵ > ۷۵	۱-۴ ۴-۷ ۷-۱۰ ۱۰-۱۳	۱۰
لیتولوژی غالب	آهک‌های ضخیم لایه آهک‌های نازک لایه سنگ‌های غیرکربناته درز و شکافدار سنگ‌های غیرکربناته فاقد درز و شکاف	۱-۳ ۳-۵ ۵-۷ ۷-۹	۴	تمرکز بارش (درصد بارش در ۲ واقعه بارشی)	< ۲۵ ۲۵-۵۰ ۵۰-۷۵ > ۷۵	۱-۲ ۲-۳ ۳-۴ ۴-۵	۸

د- محاسبه‌ی حجم تغذیه سالانه برای حوضه آبخیز مقدماتی

در این تحقیق، حجم تغذیه سالانه در حوضه آبخیز مقدماتی با استفاده از معادله زیر محاسبه شده است:

$$A = \frac{V}{P.I} \quad \text{معادله (۳-۴)}$$

در این معادله، A مساحت حوضه آبخیز بر حسب مترمربع، P میانگین بارش سالانه در حوضه آبخیز چشمه بر حسب متر، I درصد تغذیه سالانه و V حجم تغذیه سالانه چشمه بر حسب مترمکعب می‌باشد. برای چشمه‌های کارستی مورد مطالعه حجم تغذیه سالانه با استفاده از معادله فوق حدود ۱۵۹۷۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است.

ه- محاسبه‌ی حجم تخلیه سالانه برای چشمه‌های کارستی مورد نظر

به منظور محاسبه حجم تخلیه سالانه از هیدروگراف چشمه‌های غرب مجن در سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ استفاده شده است. حجم تخلیه سالانه از چشمه‌های غرب مجن از طریق محاسبه‌ی حجم زیر هیدروگراف چشمه‌ها محاسبه شده است. حجم تخلیه سالانه برای حوضه آبخیز این چشمه‌ها حدود ۱۶۱۰۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است.

ز- صحت‌سنجی حوضه آبخیز مقدماتی

با استفاده از مقادیر بارش، درصد تغذیه سالانه و مساحت حوضه آبخیز، حجم تغذیه سالانه حوضه آبخیز مقدماتی حدود ۱۵۹۷۰۰۰ مترمکعب محاسبه شد و همچنین حجم تخلیه سالانه چشمه‌ها نیز از طریق محاسبه‌ی حجم زیر هیدروگراف چشمه‌ها حدود ۱۶۱۰۰۰۰ مترمکعب برآورد شد. با مقایسه‌ی حجم تغذیه و تخلیه سالانه، خطای نسبی ۰/۸ درصد بدست آمد. با توجه به خطای نسبی اندک بین حجم‌های تغذیه و

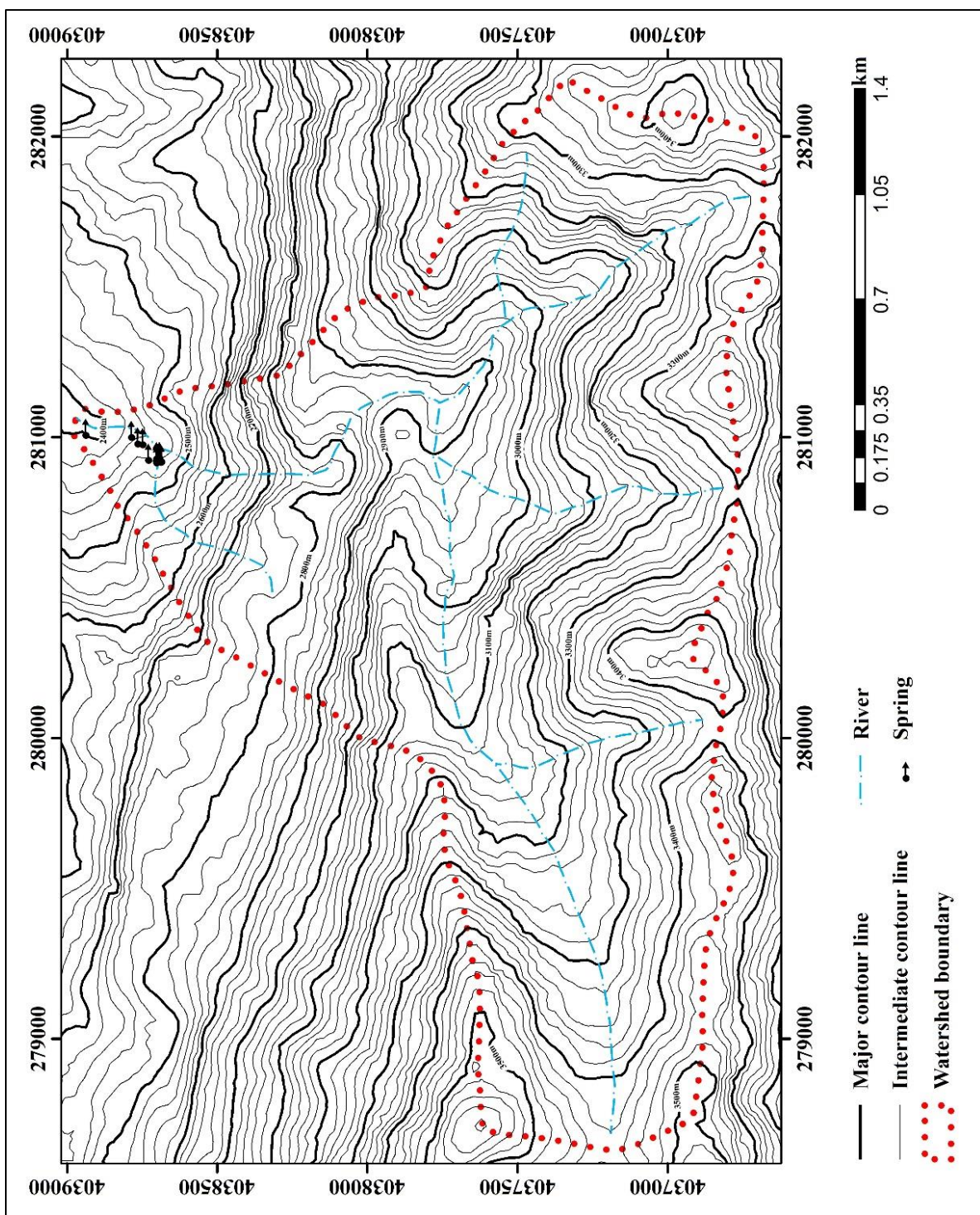
تخلیه و همچنین نحوه قرار گرفتن واحدهای سنگی مختلف در منطقه، حوضه آبرگیر ترسیم شده از دقت مناسبی برخوردار است.

۴-۶-۳- تعیین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبرگیر مورد مطالعه

حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی در منطقه مورد مطالعه با حوضه آبرگیر سطحی کم و بیش همپوشانی دارد و به همین دلیل خصوصیات فیزیوگرافی این حوضه به طور مختصر ارائه می‌شوند. مهمترین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبرگیر شامل مرز، مساحت و محیط، نیمرخ طولی آبراهه اصلی، شکل، ضریب انشعابات آبراهه‌ای، شیب متوسط، ارتفاع متوسط و زمان تمرکز حوضه می‌باشد. نحوه تعیین این خصوصیات به طور مختصر در این بخش ارائه خواهد شد:

۴-۶-۳-۱- مرز حوضه

مرز حوضه یک خط تقسیم آب فرضی است که حوضه آبرگیر را از حوضه کناری آن جدا می‌کند و از به هم پیوستن خط‌الرأس‌های ارتفاعات ایجاد می‌شود. مرز حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی و نرم‌افزار Arc GIS 10.3 ترسیم شده است و سپس با توجه به بازدیدهای صحرائی تصحیح و تکمیل گردیده است. شکل (۴-۱۶) مرز حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی غرب مجن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶- مرز حوضه آبریز چشمه‌های کارستی غرب مچن

۴-۶-۳-۲- مساحت و محیط حوضه

مساحت حوضه (A)، بارزترین مشخصه حوضه می‌باشد که دبی اوج و شکل حوضه به آن بستگی دارد. حوضه‌ها از نظر مساحت به سه دسته تقسیم می‌شوند: حوضه‌های کوچک با مساحتی کمتر از ۱۰۰ کیلومترمربع، حوضه‌های متوسط که مساحت آن‌ها بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومترمربع است و حوضه‌های بزرگ که مساحت آن‌ها بالغ بر ۱۰۰۰ کیلومترمربع می‌باشد. محیط حوضه (P)، به طول خط تقسیم آب گفته می‌شود که حوضه را از حوضه‌های مجاور جدا می‌کند (علیزاده ۱۳۸۰). مساحت حوضه آبگیر مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.3 برابر با ۴/۲۷ کیلومترمربع و محیط آن ۹/۹۱ کیلومتر برآورد شده است. بر طبق تقسیم‌بندی فوق، حوضه آبگیر مورد مطالعه، جزء حوضه‌های کوچک طبقه‌بندی می‌شوند.

۴-۶-۳-۳- شکل حوضه

شکل حوضه بر رواناب سطحی، هیدروگراف سیل و زمان تمرکز (Time of concentration) تأثیر می‌گذارد. حوضه‌های آبگیر از نظر ظاهری دارای شکل‌های گوناگونی می‌باشند که سه گروه عمده آن‌ها شامل حوضه‌های پهن، کشیده و بادبزی می‌باشند. جهت بررسی شکل حوضه آبگیر چشمه‌های غرب مجن، از ضریب شکل هورتون و ضریب فشردگی استفاده می‌شود.

الف- ضریب شکل هورتون

هورتون براساس بررسی‌های متعدد، معادله‌ی زیر را برای محاسبه ضریب شکل حوضه ارائه نموده است:

$$F_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{معادله (۴-۴)}$$

در این معادله، F_f ضریب شکل هورتون (بدون بعد)، A مساحت حوضه بر حسب کیلومترمربع و L طول

حوضه بر حسب کیلومتر می‌باشد. طبق این معادله، هر چه این عدد کوچکتر باشد نشان‌دهنده‌ی کشیدگی حوضه آبخیز می‌باشد. این ضریب برای حوضه آبخیز مورد مطالعه با مساحت ۴/۲۷ کیلومترمربع و طول حوضه ۳/۶۰ کیلومتر برابر با ۰/۳۳ می‌باشد که بیانگر کشیدگی نسبی حوضه می‌باشد.

ب- ضریب فشردگی یا گراویلیوس

گراویلیوس معادله زیر را برای محاسبه‌ی ضریب شکل حوضه پیشنهاد نموده است، و آن عبارت است از نسبت محیط حوضه به محیط دایره‌ای که سطح آن معادل سطح حوضه باشد:

$$C = \frac{P}{P'} = \frac{P}{2\sqrt{A\pi}} = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \quad \text{معادله (۴-۵)}$$

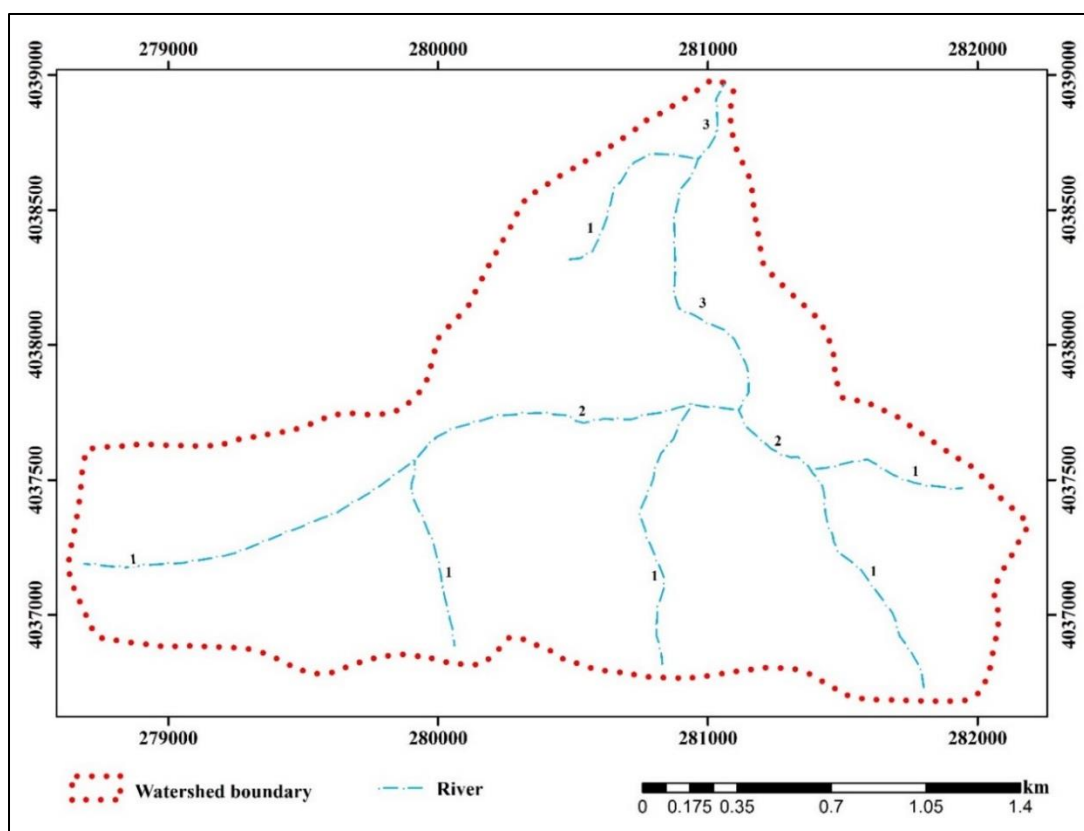
در این معادله، C ضریب فشردگی (بدون بعد)، P محیط حوضه آبخیز بر حسب کیلومتر، P' محیط دایره هم‌سطح با حوضه بر حسب کیلومتر و A مساحت حوضه بر حسب کیلومترمربع می‌باشد. این ضریب برای حوضه‌های گرد، نزدیک به یک و برای حوضه‌های کشیده بیش از یک و حدود ۱/۵ تا ۲/۵ می‌باشد (مهدوی ۱۳۷۸). براساس این معادله، ضریب فشردگی برای حوضه آبخیز مورد مطالعه برابر با ۱/۳۴ محاسبه گردید که نتیجه بدست آمده از روش هورتون را تأیید می‌کند.

۴-۳-۶-۴ - ضریب انشعابات آبراهه‌ای

به منظور تعیین تأثیر انشعابات شبکه آبراهه‌ها بر هیدروگراف سیل، از ضریب انشعابات آبراهه‌ای استفاده می‌شود. چنانچه در حوضه‌ای $n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$ و به ترتیب تعداد آبراهه‌های رده 1، 2، 3، ... و i باشد، ضریب انشعابات آبراهه‌ای از معادله زیر بدست می‌آید:

$$BR = \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_3} + \frac{n_3}{n_4} + \dots + \frac{n_{i-1}}{n_i} \right) \frac{1}{i-1} \quad \text{معادله (۴-۶)}$$

شکل (۴-۱۷) رده‌بندی شبکه آبراه‌های حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن را نشان می‌دهد. در حوضه آبرگیر مورد مطالعه $n_1=6$ ، $n_2=2$ ، $n_3=1$ و $i=3$ می‌باشد که طبق معادله (۴-۶)، ضریب انشعابات آبراه‌های برابر با $2/5$ بدست می‌آید. هر چه مقدار این ضریب کوچکتر باشد، دبی اوج بالاتر و زمان وقوع دبی اوج سریعتر می‌باشد. به عبارت دیگر، هر چه ضریب انشعاب آبراه‌های کمتر باشد، حوضه سیل‌خیزی بالاتری را شامل می‌شود.

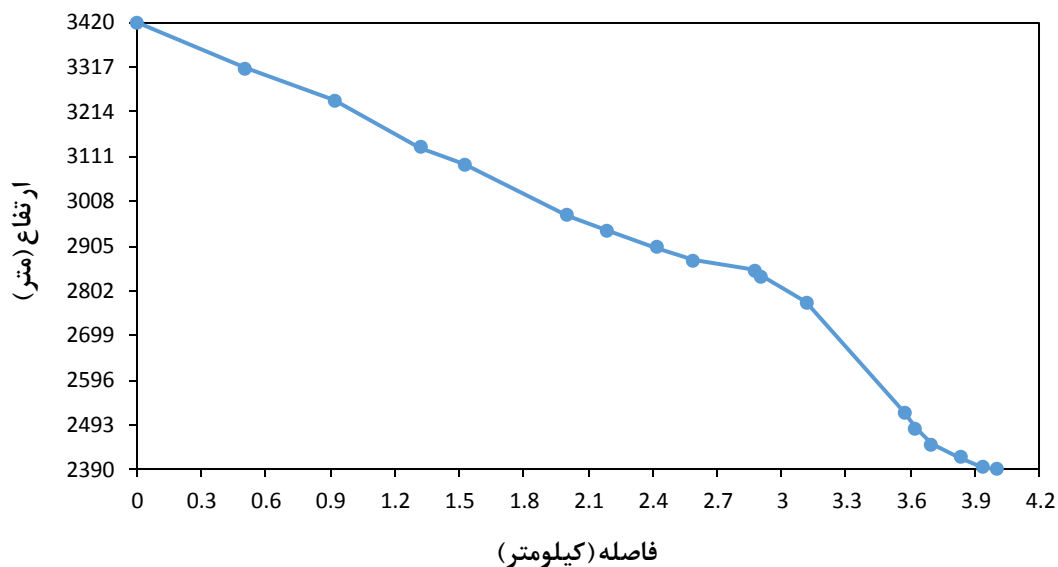


شکل ۴-۱۷- انشعابات آبراه‌های حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن

۴-۳-۵- نیمرخ طولی آبراه اصلی

نیمرخ طولی آبراه اصلی با استفاده از دو پارامتر ارتفاع و طول آبراهه ترسیم می‌شود. با استفاده از نیمرخ طولی آبراهه اصلی می‌توان اطلاعات مفیدی راجع به سرعت حرکت آب، قدرت فرسایشی رودخانه و زمان

تمرکز بدست آورد. شکل (۴-۱۸) نیمرخ طولی آبراهه اصلی حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸- نیمرخ طولی آبراهه اصلی حوضه آبرگیر چشمه‌های غرب مجن

۴-۶-۳- شیب آبراهه

به کمک اطلاعات مربوط به نیمرخ طولی، شیب آبراهه اصلی محاسبه می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه شیب آبراهه اصلی وجود دارد که در اینجا به دلیل وجود شیب غیریکنواخت آبراهه از روش میانگین وزنی شیب استفاده می‌شود و از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\bar{S} = \frac{\sum S_i L_i}{L} \quad \text{معادله (۴-۷)}$$

در این معادله، \bar{S} میانگین وزنی شیب به درصد، S_i شیب دو نقطه از مسیر، L_i فاصله بین دو نقطه از مسیر بر حسب متر و L طول آبراهه اصلی بر حسب متر می‌باشد. طبق این معادله، شیب متوسط آبراهه برابر با ۰/۲۵ بدست آمده است.

۴-۶-۳-۷- شیب متوسط حوضه

جهت محاسبه شیب متوسط حوضه روش‌های مختلفی وجود دارد که در این مطالعه از روش هورتون استفاده شده است. طبق روش هورتون، درصد شیب متوسط حوضه از معادله زیر بدست می‌آید:

$$S = \frac{\sum L.H}{A} \times 100 \quad \text{معادله (۴-۸)}$$

در این معادله، S شیب متوسط حوضه بر حسب درصد، $\sum L$ مجموع طول خطوط تراز داخل حوضه بر حسب کیلومتر، A مساحت حوضه آبرگیر بر حسب کیلومتر مربع و H اختلاف ارتفاع بین خطوط تراز بر حسب کیلومتر می‌باشد. برای حوضه آبرگیر مورد مطالعه، A برابر با $4/27$ کیلومتر مربع، H برابر با $0/200$ کیلومتر و $\sum L$ برابر با $12/69$ کیلومتر می‌باشند. بنابراین، شیب متوسط حوضه با توجه به معادله فوق، برابر با 59 درصد برآورد شده است.

۴-۶-۳-۸- محاسبه زمان تمرکز حوضه مورد مطالعه

حداکثر زمانی که طول می‌کشد تا آب از دورترین نقطه حوضه مسیر هیدرولوژیکی خود را طی کرده و به نقطه خروجی برسد، زمان تمرکز نام دارد. در واقع زمان تمرکز تابعی از خصوصیات فیزیکی سطح حوضه است (علیزاده ۱۳۸۰). در این مطالعه، جهت محاسبه زمان تمرکز حوضه از معادله کرپیچ و کالیفرنیا استفاده شده است:

الف- معادله کرپیچ

کرپیچ (Kirpich 1940)، معادله زیر را برای تخمین زمان تمرکز حوضه آبرگیر ارائه داده است:

$$t_c = 0.00032L^{0.77}S^{-0.385} \quad \text{معادله (۴-۹)}$$

در این معادله L طول آبراهه اصلی بر حسب متر، S شیب متوسط آبراهه و t_c زمان تمرکز بر حسب ساعت می‌باشد. این معادله در حوضه‌های کوچک به خوبی قابل استفاده است. برای حوضه آبخیز مورد مطالعه، زمان تمرکز بدست آمده برابر با $0/32$ ساعت می‌باشد.

ب- معادله کالیفرنیا

طبق روش کالیفرنیا (CDH 1960)، زمان تمرکز طبق معادله زیر محاسبه شده است:

$$t_c = (0.885L^3\Delta H^{-1})^{0.385} \quad \text{معادله (۴-۱۰)}$$

در این معادله L طول آبراهه اصلی بر حسب کیلومتر، ΔH اختلاف ارتفاع حوضه بر حسب متر، t_c زمان تمرکز بر حسب ساعت می‌باشد. این معادله برای حوضه‌های کوچک کوهستانی کاربرد دارد. با استفاده از این معادله، مقدار زمان تمرکز برای حوضه مورد مطالعه $0/31$ ساعت بدست آمده است.

حوضه آبخیز منطقه مورد مطالعه با مساحت $4/27$ کیلومترمربع و محیط $9/91$ کیلومتر، دارای ارتفاع متوسط 3090 متر از سطح دریا می‌باشد. با توجه به ضرایب عددی محاسبه شده و استنباط شکل نسبتاً کشیده (تقریباً قیفی شکل یا بادبزی) می‌توان اظهار داشت که این حوضه دارای زمان تمرکز کوتاه بوده است، همچنین می‌توان انتظار داشت که حوضه مورد مطالعه عکس‌العمل سریع و زمان آبخیزی کوتاه داشته باشد. همچنین با توجه به نسبت انشعابات برابر با $2/5$ می‌توان انتظار چنین رفتاری را از حوضه مورد مطالعه داشت. شیب متوسط حوضه برابر با 59 درصد تخمین زده شده است که با توجه به رقم نسبتاً بالای آن، خود از عوامل زمان آبخیزی کوتاه و عکس‌العمل سریع حوضه در زمان وقوع بارندگی است.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل ابتدا مهمترین نتایج بدست آمده از مطالعه هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب مجن ارائه می‌شوند. سپس پیشنهادهایی جهت انجام مطالعات تکمیلی و مدیریت آبخوان کارستی مورد مطالعه ارائه می‌گردد:

۵-۱- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج بدست آمده از این تحقیق شامل درجه توسعه کارست در منطقه، سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه، ارزیابی حوضه آبخیز چشمه‌های کارستی، نوع چشمه‌ها، تیپ غالب آب و جنس غالب آبخوان می‌باشد که به طور مختصر ارائه می‌شوند:

الف- درجه توسعه کارست در منطقه

در حوضه آبخیز چشمه‌های کارستی مورد مطالعه، عوارض مورفولوژیکی معرف کارست‌های توسعه‌یافته همچون فروچاله‌ها، گودی‌های مسدود، پلیه‌های کارستی دیده نمی‌شوند. این نتایج بدست آمده بیانگر توسعه نسبتاً متوسط کارست در حوضه آبخیز چشمه‌های مجن می‌باشد. وجود سنگ‌های برهنه (به عنوان شاهدهی بر توسعه‌یافتگی کارست) در حوضه آبخیز چشمه‌ها به دلیل شیب بالای منطقه می‌باشد که از ایجاد خاک و اپی‌کارست بر روی سنگ‌های کارستی جلوگیری نموده‌اند.

ب- سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه

برای تعیین نوع جریان در آبخوان‌های کارستی از تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی آب خروجی از چشمه‌ها استفاده می‌شود. تغییرات زمانی خواص فیزیکی (دبی و دما) و شیمیایی (هدایت الکتریکی) آب خروجی از چشمه‌های غرب مجن نسبتاً کم می‌باشد، به طوری که ضریب تغییرات تمامی پارامترها بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان کارستی این چشمه‌ها می‌باشد. همچنین منحنی فرود چشمه‌های مورد مطالعه دارای یک ضریب بده با شیب $0/009$ می‌باشد که این نیز بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان کارستی مورد نظر می‌باشد و با خصوصیات ژئومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه که بیانگر توسعه نسبتاً متوسط کارست در حوضه آبخیز چشمه‌های مجن می‌باشد، همخوانی دارد.

ج- ارزیابی حوضه آبخیز چشمه‌های کارستی

برای تعیین محدوده‌ی مقدماتی حوضه آبخیز چشمه‌ها از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و هیدروژئولوژی استفاده گردید. مساحت حوضه آبخیز مقدماتی ترسیم شده برای چشمه‌های کارستی غرب مجن حدود $4/27$ کیلومترمربع برآورد شده است. برای محدوده حوضه آبخیز، میانگین بارش سالانه با استفاده از نمودار ارتفاع- بارش ایستگاه‌های مجاور، 550 میلی‌متر انتخاب شد. درصد تغذیه سالانه در حوضه آبخیز با توجه به معیارهای مختلف مانند بارش برف، شیب زیاد حوضه و عدم وجود اپی‌کارست در منطقه مورد مطالعه، $0/68$ برآورد شده است. سپس با داشتن مقادیر بارش، درصد تغذیه سالانه و مساحت حوضه آبخیز، حجم تغذیه سالانه حوضه آبخیز مقدماتی حدود 1597000 مترمکعب محاسبه شد. علاوه بر این، حجم تخلیه سالانه چشمه‌ها نیز از طریق محاسبه‌ی حجم زیر هیدروگراف حدود 1610000 مترمکعب بدست آمد. با استفاده از روش بیلان و مقایسه‌ی حجم تغذیه و تخلیه سالانه، خطای نسبی $0/8$ درصد

محاسبه شد که با توجه به خطای نسبی اندک بین حجم‌های تغذیه و تخلیه و همچنین نحوه قرار گرفتن واحدهای سنگی مختلف در منطقه، حوضه آبرگیر ترسیم شده از دقت مناسبی برخوردار است.

د- نوع چشمه‌ها

چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه از نوع چشمه‌های سرریزی می‌باشند که یکی از دلایل اصلی ظهور این چشمه‌ها، برخورد آب زیرزمینی حوضه کارستی این چشمه‌ها (سنگ‌های آهکی توده‌ای و ضخیم لایه سازند لار) با واحدهای غیرقابل نفوذ (مارن‌ها و آهک‌های مارنی) می‌باشد که باعث بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و تشکیل چشمه‌های این منطقه شده است و به همین دلیل این چشمه‌ها از نوع چشمه‌های سرریزی (Overflow Springs) می‌باشند.

ه- تیپ غالب آب و جنس غالب آبخوان

نمودارهای هیدروشیمیایی مربوط به نمونه‌های تهیه شده از چشمه‌های مورد مطالعه در خرداد ماه ۱۳۹۶ نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها دارای کلسیم و بی‌کربنات بالایی می‌باشند و در آن‌ها غلبه با اسیدهای ضعیف و عناصر قلیایی خاکی می‌باشد و تمام نمونه‌ها در محدوده خاص آب‌های کارستی واقع شده‌اند. از نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم برای تعیین جنس غالب آبخوان در مناطق کارستی استفاده می‌شود. به طور کلی نسبت‌های نزدیک به یک مربوط به آبخوان‌های کارستی دولومیتی و نسبت‌های بین دو تا ده مربوط به آبخوان‌های کارستی آهکی می‌باشند. میانگین نسبت یون کلسیم به منیزیم برای نمونه‌های مورد مطالعه حدود ۲/۶۰ می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت لیتولوژی غالب آبخوان کارستی مورد مطالعه، آهک می‌باشد.

۵-۲- پیشنهادها

در پایان برای هر چه بهتر انجام شدن مطالعات تکمیلی بر روی چشمه‌های کارستی غرب مجن پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

۱- نصب باران‌سنج در ارتفاعات برای برآورد دقیق‌تر بارش سالانه در منطقه

۲- نصب اشل برای اندازه‌گیری دقیق آبدهی چشمه‌ها

۳- بررسی ایزوتوپی چشمه‌های منطقه

منابع مورد استفاده

- آقائاتی ع، (۱۳۸۳)، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی ایران، ص ۷۳۵.
- ازانی س، (۱۳۹۵)، "ارزیابی توسعه کارست در کوه‌های آهکی آهنگران، شمال شرق بیرجند"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۱۱۲.
- باقری ر. رئیسی ع. زارع م. و 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، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ترشیزیان ح. موسوی حرمی ر. و نجفی م، (۱۳۷۹)، "مطالعه زمین ریخت‌شناسی کارست و بررسی پتانسیل آب در سازندهای سخت گستره مشهد- چناران"، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تبریز.
- چیت‌سازان م. سیدی‌پور م. و میرزایی ی، (۱۳۸۷)، "تعیین خصوصیات آبخوان کارستی چشمه برم جمال با استفاده از پاسخ‌های فیزیکی- شیمیایی"، مجله آب و فاضلاب، شماره ۶۸، ص ۷۸-۷۲.
- رحیمی‌دهکردی ف. کرمی غ. و 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، دانشگاه شهید بهشتی.
- رضایی م، (۱۳۷۹)، "پیش‌بینی تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی در دوره‌های خشکسالی"، اولین کنفرانس ملی مقابله با کم‌آبی و خشکسالی، جهاد دانشگاهی استان کرمان.
- روحتافی پ. رضایی م. اشجاری ج. و افشار س، (۱۳۹۵)، "تحلیل هیدروگراف چشمه گورگور در استان اردبیل"، سی و پنجمین گردهمایی ملی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- ریاحی پور م. و کلانتری ن، (۱۳۸۷)، "تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی پیرغار به روش زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی"، مجموعه مقالات دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، اهواز- شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب.
- سامانی ن. و زارعی م، (۱۳۸۵)، "مقایسه خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های گر- برم فیروز و ساسان با استفاده از منحنی فروکش هیدروگراف چشمه‌های کارستی شش‌پیر و ساسان"، دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- سیادتی ب، (۱۳۷۸)، "بررسی گسترش کارست در ساختگاه سد لار"، سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شیراز.
- شبان م، (۱۳۹۰)، "تعیین حوضه آبریز و منابع تأمین آب چشمه سبزاب (شمال شرق مسجد سلیمان)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شفیع‌مطلق خ. و لشکری پور غ، (۱۳۸۷)، "بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی کورسا دهدشت"، چهارمین همایش زمین‌شناسی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.
- شکری م. اشجاری ج. و کرمی غ، (۱۳۷۴)، "تأثیر تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت‌یابی جریان آب زیرزمینی در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان"، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- علیزاده ا، (۱۳۸۰)، "اصول هیدرولوژی کاربردی"، چاپ سیزدهم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، ص ۷۳۵.
- کرمی غ، (۱۳۷۲)، "بررسی رابطه بین عوامل نفوذ آب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی کوه‌های گر و برم فیروز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.

- کرمی غ، (۱۳۸۳)، "بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی چشمه علی دامغان"، طرح پژوهشی با کد ۲۱۰۷، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده علوم زمین، ص ۴۷.
- کرمی غ، (۱۳۸۸)، "نقش چینه‌شناسی در توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان"، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، شماره پیاپی ۳۶، شماره اول، ص ۵۲-۳۹.
- کرمی غ. خسروی سوادجانی ر. و طاهری ع، (۱۳۹۰)، "بررسی وجود و یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان کارستی چشمه امام‌قیس با چاه‌های آب مجاور"، هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کرمی غ. رجائی ا. و کمالی‌نیسیانی م، (۱۳۸۷)، "کاربرد مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی در بررسی آب‌بندی سازندهای کارستی"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز.
- کریمی ا، (۱۳۸۰)، "مطالعه هیدروژئولوژیکی آبخوان کارستی تاقدیس پابده لالی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- کریمی ح. رئیسی ع. و زارع م، (۱۳۸۳)، "جریان افشان کاذب، تعبیر جدیدی از جریان در محیط‌های کارستی"، مجموعه مقالات هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کریمی‌وردنجانی ح، (۱۳۸۴)، "بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی موگرمون و سرآسیاب"، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- کریمی‌وردنجانی ح، (۱۳۸۹)، "هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها)"، انتشارات ارم شیراز.
- کریمی‌وردنجانی ح. چیت‌سازان م. کریمی ح. محرایی‌نژاد ع. و زارع‌پور م، (۱۳۹۲)، "خصوصیات هیدروژئولوژی و هیدرووشیمی بزرگترین چشمه ایران، سوسن"، هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شهید بهشتی.
- مهدوی م، (۱۳۷۸)، "هیدرولوژی کاربردی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

• میرحسنى ق. باقرى ر. و نيك قوجق ى، (۱۳۹۵)، "تحليل منحنى فرود و تعيين حوضه آبگير چشمه‌ى كارستى زاو در منطقه كالاله، استان گلستان"، سى و پنجمين گردهمايى ملى علوم زمين، سازمان زمين‌شناسى و اكتشافات معدنى كشور.

• مينويى ا. كرمى غ. و اميدى پ، (۱۳۸۹)، "هيدروژئولوژى و هيدروژئوشيمى چشمه‌هاى كارستى قلوز و تلوکسان در کوه‌هاى شاهو"، مجموعه مقالات نخستين کنفرانس پژوهش‌هاى کاربردى منابع آب ايران، دانشگاه صنعتى کرمانشاه.

• نجفى ز. كرمى غ. و طاهرى ع، (۱۳۸۸)، "ارزيابى ميزان نفوذ در آهک‌هاى كارستى بيستون در شرق و جنوب شرق روانسر"، اولين همایش زمین‌شناسی فلات ایران، کرمان.

• نقشه زمين‌شناسى ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود، سازمان زمين‌شناسى و اکتشاف معدنى كشور.

• نورى م، (۱۳۸۹)، "بررسى توسعه كارست در جنوب شرق تاقدیس کبیر کوه ایلام"، پايان‌نامه كارشناسى ارشد، دانشگاه صنعتى شاهرود، ص ۹۴.

• ودیعتى م. خدرى ا. و مصلح ا، (۱۳۹۴)، "ارزيابى هيدروژئولوژيکى چشمه كارستى پيرغار براساس تحليل هيدروگراف چشمه"، کنفرانس بين‌المللى توسعه با محوريت کشاورزی، محيط زیست و گردشگری، تبریز.

• Amit H. Lyakhovsky V. Katz A. Strasinsky A. and Burg A., (2002), "Interpretation of Spring Recession Curves", *Groundwater*, 40 (5): 543-551.

• Ashjari J. and Raeisi E., (2006), "Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran", *Journal of Cave and Karst Studies*, 68 (3): 118-129.

• Bagheri R. Jafari H. Momeni A. and Bagheri F., (2016), "Analysis of karst spring recession curves, West of Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 731.

• Bögli A., (1980), "Karst Hydrology and Physical Speleology", Berlin: Springer-Verlag, pp. 285.

- Bonacci O., (1990), "Specific hydrological characteristics of the karst system", Proc. Of the 3rd int, Iranian congress of civil Eng., 2: 175-196.
- Bonacci O., (2001), "Analysis of the maximum discharge of karst springs", Hydrogeology Journal, 9 (4): 328-338.
- Bonacci O. and Andric I., (2015), "Karst spring catchment: an example from Dinaric karst", Environmental Earth Sciences, 74 (7): 6211-6223.
- California Division of Highways (CDH)., (1960), "California culvert practice", Dep. of public works, Division of Highways, Sacramento, CA.
- Chow V.T., (1988), "Applied Hydrology", McGraw-Hill, pp. 572.
- Coetsiers M. and Walraevens K., (2006), "Chemical characterization of the Neogene Aquifer, Belgium", Hydrogeology Journal, 14: 1556-1568.
- Cowell D.W. and Ford D.C., (1983), "Karst hydrology of the Bruce Peninsula, Ontario, Canada", Journal of Hydrology, 61: 163-168.
- Desmarais K. and Rojstaczer S., (2002), "Inferring source waters from measurements of carbonate spring response to storms", Journal of Hydrology, 260: 118-134.
- Dewandel B. Lachassagne p. Bakalowicz M. Weng Ph. and Al-Malki A., (2003), "Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer", Journal of Hydrology, 274: 248-269.
- Ede N.T., (1972), "Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor", Soil Science Society of America Journal, 39 (2): 361-365.
- Fiorillo F., (2014), "The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers", Water Resources Management, 28: 1781–1805.
- Fleury P. Plagnes V. and Bakalowicz M., (2007), "Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France)", Journal of Hydrology, 345 (1-2): 38-49.
- Ford D.C. and Williams P.W., (1989), "Karst geomorphology and hydrology", London: Chapman and Hall, pp. 601.
- Ford D.C. and Williams P.W., (2007), "Karst Hydrogeology and Geomorphology", John Wiley and Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, pp. 562.

- Francesco F., (2011), "Tank-reservoir drainage as a simulation of the recession limb of karst spring hydrograph", *Hydrogeology Journal*, 19 (5): 1009-1019.
- Gams I., (1966), "Factors and dynamics of corrosion of the carbonate rocks in the Dinaric and Alpine karst of Slovenia (Yugoslavia)", *Geografski Vestnik*, 38: 11-68.
- Garrels R.M. and Christ C.I., (1965), "Solutions, Minerals and Equilibrium", Harper and Row, New York, 2nd ed., pp. 450.
- Goldscheider N. and Neukum Ch., (2010), "Fold and fault control on the drainage pattern of a double-karst-aquifer system, Winterstaude, Austrian Alps", *Acta Carsologica*, 13 (2): 173-186.
- Guany G., (2006), "Hydrology and Hydrogeology of Sakaryabasi Karstic Springs, Cifteler, Turkey", *Environ Geo l.*, 51: 229-240.
- Jacobson R.L. and Langmuir D., (1974), "Controls on the quality variations of some carbonate spring waters", *J. Hydrol.*, 23: 247-265.
- Jiang G. and Guo F., (2010), "Interpreting source of Lingshui spring by hydrogeological, chemical and isotopic methods", *Advances in Research in Karst Media*, 4th International symposium on karst (ISKA, 2010), Malaga, Spain, pp. 177-181.
- Karami GH., (2002), "Assesment of heterogeneity and flow system in karstic aquifers using pumping test data", p.h.D. Thesis, school of civil engineering and Geosciences univercity of Newcastle upon type, pp. 180.
- Karimi H. Keshavarz T. Mohammadi Z. and Raeisi E., (2007), "Potential leakage at the Khersan 3 Dam Site, Iran: A hydrogeological approach", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66: 269-278.
- Karimi H. Raeisi E. and Zare M., (2005), "Physicochemical time series of karst springs as a tool to diffrentiate the source of spring water", *Carbonates and Evaporites*, 20 (2): 138-147.
- Kastning E.H., (1977), "Faults as positive and negative influences on groundwater flow and conduit enlargement, in Dilamarter" R.R., and Csallany, S.C., eds., *Hydrologic problems in karst regions*, Bowling Green, Western Kentucky University, pp. 193-201.
- Katsanou K. Siavalas G. and Lambrakis N., (2010), "Water origin of the Kokkino Stefani spring (W Greece) based on hydrogeochemical data", *Advances in Research in Karst Media*, 4th International symposium on karst (ISKA, 2010), Malaga, Spain, pp. 195-201.

- Kirpich Z.p., (1940), “Time of concentration of small agricultural watersheds”, civil Eng., 10 (6): 362-368.
- Komak B., (2006), “The Karst Springs of The Kanin Massif, (Kraski Izviri Pod Kaninskim Pogorjem)”, <http://www.zrc-sazu.si/giam/zbornik/komac41>.
- Kovacs A. Perrochet P. Kiraly L. and Jeannin P.Y., (2005), “A quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis”, Journal of Hydrology, 303: 152-164.
- Kresic N., (2013), “Water in Karst: Management, Vulnerability and Restoration”, New York: McGraw-Hill, pp. 736.
- Lacey G.C. and Grayson R.B., (1998), “Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia”, Journal of Hydrology, 204: 231–250.
- Lamban L.J. Joder J. Custodio E. Soler A. Sapriza G. and Soto R., (2015), “Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study”, Science of the Total Environment, 506-507: 466-479.
- Linsley R.K. Kohler M.A. and Paulhus J.L.H., (1988), “Hydrology for engineers”, SI metric ed., McGraw-Hill, pp. 492.
- Lopez-Chicaco M. Boumama M. Vallejos A. and Pulido-Bosch A., (2001), “Factors which determine the hydrogeochemical behavior of karstic springs. A case study from the Betic Cordilleras, Spain”, Applied Geochemistry, 16: 1179-1192.
- Maillet E., (1905), “Essais di'hydraulique souterraine et fluviale”, Hermann et Cie, Paris, pp. 218.
- Malvicini C.F. Steenhuis T.S. Walter M.T. Parlange J.Y. and Walter M.F., (2005), “Evaluation of spring flow in the uplands of Matalom, Leyte, Philippines”, Adv Water Res., 28 (10): 1083–1090.
- Milanovic P.T., (1981), “Karst Hydrogeology”, Water Resources Publication, pp. 434.
- Mohammadi Z. and Field M., (2009), “On the Temporal Behavior of Karst Aquifers, zagros Region, Iran, A Geostatistical Approach”, Journal of Cave and Karst Studies, 71 (3): 210-226.

- Mohammadi Z. and Raeisi E., (2007), “Hydrogeological uncertainties in delineation of leakage at karst dam sites, the Zagros Region, Iran”, *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (3): 305–317.
- Newson M.D., (1972), “Comments on seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs, by Even T. Shuster and William B. White”, *Journal of Hydrology*, 16: 49-51.
- Padilla A. Pulido-Bosh A. and Mangin A., (1994), “Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring”, *Ground Water*, 32: 267–277.
- Panagopoulos G. and Lambrakis N., (2006), “The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete)”, *J. Hydrol.*, 329 (3-4): 368-376.
- Pitty A.F., (1966), “The estimation of discharge from a karst rising by natural salt dilution”, *Journal of Hydrology*, 4: 63-69.
- Pitty A.F., (1968), “Some features of calcium hardness fluctuations in two karst streams and their possible value in geohydrological studies”, *Journal of Hydrology*, 6: 202-208.
- Pitty A.F. Haliwell R.A. Ternan J.L. Whittel P.A. and Cooper R.G., (1979), “The range of water temperature Fluctuations in the limestone waters of the central & southern Pennines”, *Journal Hydrology*, 41: 157-159.
- Raeisi E., (2002), “Carbonate karst caves in Iran, In: Kranjc A (ed) Evolution of karst: from prekarst to cessation” , Ljubljana-Postojna, pp. 339-344.
- Raeisi E. Groves C. and Meiman J., (2006), “Effects of partial and full pipe flow on hydrochemographs of Logsdon River, Mammoth Cave Kentucky USA”, *Journal of Hydrology*, 337: 1-10.
- Raeisi E. and Karami GH., (1997), “Hydrochemographs of Berghan karst spring as indicators of aquifer characteristics”, *Journal of Cave and Karst Studies*, 59(3): 112-118.
- Raeisi E. Pezeshkpoor P. and More F., (1993), “Characteristics of karst aquifer as indicated by temporal changes of the springs physico-chemical parameters”, *Iranian Journal of Science and Technology*, 17: 17-28.
- Ryan M. and Meiman J., (1996), “An examination of short-term variations in water quality at a karst spring in Kentucky”, *Ground water*, 34 (1): 23-30.

- Samani N., (2001) , “response of karst aquifer to rain fall and evaporation moharlo basin , iran”,*Journal of cave and karst studies*, p.p. 33-40.
- Scanlon B.R. and Thrailkill J., (1987),“Chemical similarities among physically distinct spring types in a karst terrains”, *Journal of Hydrology*, 89: 259-279.
- Shuster E.T. and White W.B., (1971), “Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing aquifers”, *Journal of Hydrology*, 14: 93-128.
- Ternan J.L., (1972), “Comments on the use of calcium hardness variability index in the study of carbonate aquifers: with reference to Central Pennines, England”, *J. Hydrol.*, 16: 317-334.
- Todd D.K., (1980), “Groundwater Hydrology”, John Wiley and Sons, New York, pp. 539.
- Todd D.K. and Mays L.W., (2005), “Groundwater Hydrology”, John Wilic and Sons, Ilc, New York, pp. 636.
- Twidale C.R. and Campbell E.M., (1993), “Australian Landforms: structure, process and time”, Gleneagles Publishing Adelaide, pp. 560.
- White W.B., (1969), “Conceptual Model for Carbonate Aquifers”, *Ground Water*, 7(3): 15-21.
- White W.D., (1988), “Geomorphology and hydrology of karst Terrains”, Oxford University Press, pp. 464.
- White W.B., (2002), “Karst hydrology: recent developments and open questions”, *Engineering Geology*, 65: 85-105.
- Zabidi H. and Freitas M., (2006), “Structural studies for the prediction of karst in the Kuala Lumpur limestone”, *IAEG*, pp. 264.
- Zolt J., (1960), “Die hydrographic des nordostalpinem karsts”, *Steirische Beitrage Hydrogeologic*, 2: 183.

Abstract

The studied region is located at 8 kilometer of west Mojen in the south of Mojen waterfall, a part of the Shahrood county. In order to study the hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of springs, discharge, electrical conductivity and temperature were measured from October 2017 to November 2018. Due to negligible changes in electrical conductivity, ions concentration were analysed in two periods (June and October 2018). The obtained results showed that the coefficients of variations for the physical and chemical characteristics of springs are relatively negligible. The negligible coefficients of variations of discharge, electrical conductivity and water temperature confirm the dominant diffuse flow system in the study area. In addition to the negligible temporal variations in above mentioned, the non-existence of morphological features which indicating the developed of karst, such as closed depressions, sinkholes and poljes, also confirm dominant diffuse flow system in the region. Recession curve of the studied springs has solely one coefficient of discharge (α) with a gradient of 0.009 which indicates the dominant diffuse flow system in that karstic aquifer. One of the main reasons for the emergence of the springs in the studied region is contact of groundwater in the karstic catchment of these springs (Limestone rock formations of the Cretaceous and Lar) with impervious units (marls and marly limestone). According to the springs of the area are overflow springs. Also in this research, the primary catchment area of the springs was drawn. Then precision of this primary catchment area was evaluated by the water budget method and comparing its values of annual discharge and recharge volumes. According to the mentioned comparison a relative error of 0.8 percent was obtained. Due to the negligible relative error between annually recharge and discharge volumes and the location of different rock units in the region, the drawn catchment area is quite accurate.

Keywords: Hydrogeology, hydrogeochemistry, karst springs Mojen



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

**Evaluating the hydrogeological and hydrogeochemical
characteristics of Karst Springs in West of Mojen**

By:

Sima Tavakkoli

Supervisor:

Dr Gholamhossein Karami

January 2018