

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

دانشکده علوم زمین

گروه آبشناسی

**بررسی توسعه کارست در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان با تلفیق
مطالعات هیدروژئولوژیکی، GIS و RS**

نگارنده:

محمد شکری

اساتید راهنما:

دکتر غلامحسین کرمی

دکتر جواد اشجاری

دی ۱۳۹۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :
تاریخ :
ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محمد شکری رشته زمین شناسی، گرایش آشناسی. تحت عنوان: بررسی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی، GIS و RS که در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۷۵) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر غلامحسن کرمی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	دکتر جواد اشجاری	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر غلامعباس کاظمی	دانشیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر هادی جعفری	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر پرویز امیدی	استادیار	

رئیس دانشکده:

تعهد نامه

اینجانب محمد شکری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین شناسی آبشناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی، GIS و RS تحت راهنمایی دکتر دکتر غلامحسین کرمی و دکتر جواد اشجاری متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

۹۰/۱۱/۳۰

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است

به پاس محبت های بی دینشان که حرکت فریادش می کند

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

و تقدیم به

آنانکه اهل یافتن نه اهل یافتن

و آنانکه متواضعانه معترف اند حقیقتی را یافته اند نه کل حقیقت را

حمد و سپاس پروردگاری که لطف و کرم بی کرانش اینجانب را نیز در برگرفت تا بدو معنای خوشگامی که چک در کسره علم و معرفت بردارم. بر خود لازم میدانم از تمام کسانی که در این راه یاری کردم بگذرد سپاسگزار می کنم. از پدر،

مادر و خانواده عزیزم که در تمام مراحل زندگی یار و یاورم بگذرد سپاسگزار می کنم.

از جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی و دکتر جواد شماری اساتید راهبهای فرهیخته و بزرگوارم که اولین روشی، نقش و راهبهای این راه بودند و بدون رهنمودهای ارزنده ایشان، به پایان رساندن این تحقیق ممکن نبود. کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. از اساتید دوره کارشناسی آقای دکتر ایاسی (دانشگاه تهران)، اساتید دانشگاه صنعتی شاهرود دکتر کاظمی، دکتر جعفری، دکتر طاهری، دکتر امید، دکتر رضائی و سرکار خانم دکتر زقانی و همچنین از آقای دکتر پیرمالک (دانشگاه هیدروژئولوژی و ژئوترمال جمهوری اسلواکی) که به این حقیر کمک نمودند، تشکر میکنم. همچنین از کارکنان محترم دانشگاه علوم زمین و دانشگاه صنعتی شاهرود، ریاست و پرسنل امور آب شهرستان دامغان، شرکت آبان رود و سازمان فضایی گل کشور که تصاویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه را در اختیار اینجانب گذاشتند، تشکر و قدردانی میکنم. از حراست و مسئول کانکس های مجموعه چشمه علی، آقای کشاورزبان که با در اختیار گذاشتن و سید نظیر شخصی خودم ایاری نمودند سپاسگزارم میکنم. از دوست عزیزم آقای اکبر خدزی (دانشگاه تربیت معلم تهران)، دوستان خوبم آقای وحید شیبی و وحید قبادی که در مطالعات صحرایی قدم به قدم یار و یاور من بودند صمیمانه تشکر میکنم. همچنین آقایان حامد قاضیان و روح امده دزی و از سایر دوستانی که به هر نحوی در انجام این تحقیق کمک نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی میکنم.

محمد کشمیری (پس من ماه ۱۳۹۰)

آسمان فرصت پرواز بلند است ولی قصد این است چه اندازه کوترا باشی...

چکیده

عوامل مختلفی در توسعه کارست دخیل هستند که بسته به شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و تکتونیکی متفاوت می‌باشد. میزان توسعه یافتگی متفاوت خواهد بود. بررسی توسعه کارست بیشتر بر مشاهدات و قضاوت‌های شخصی استوار بوده است. اخیراً محققین درصدد ارائه راهکار علمی و منطقی در راستای کمی‌سازی آن نموده‌اند. روش‌های به کار گرفته شده در دو گروه قرار می‌گیرند. ارزیابی توسعه سطحی کارست بر اساس اشکال انحلالی نظیر فراوانی و تراکم آب‌فروچاله‌ها می‌باشد و در گروه دوم ارزیابی توسعه درونی کارست با استفاده از هیدروگراف و کموگراف چشمه‌های کارستی می‌باشد. هدف از این تحقیق استفاده و مقایسه هر دو روش مزبور برای حوضه آبخیز چشمه علی دامغان می‌باشد. منطقه مورد مطالعه در ۳۲ کیلومتری شمال شهر دامغان است. به منظور دستیابی به هدف مورد نظر، سعی بر آن بوده است که با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS و تجزیه و تحلیل شکستگی‌های اندازه‌گیری شده در چند ایستگاه به بررسی توسعه سطحی کارست پرداخته شود. سپس با استفاده از داده‌های آماربرداری شده در سالهای آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در سالهای ۱۳۹۰-۱۳۸۹ به بررسی توسعه زیرسطحی یا درونی آبخوان کارستی با تجزیه و تحلیل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه و روش‌های هیدروگراف و کموگراف پرداخته شده است. در نهایت توسعه سطحی کارست با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS، مدل توسعه سطحی کارست در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان تهیه شد. صحت‌سنجی مدل تهیه شده با مشاهدات صحرائی تایید گردید. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین درصد مساحت تشکیل دهنده حوضه آبخیز، نواحی با توسعه متوسط کارست بوده است. تجزیه و تحلیل هیدروگراف و منحنی فرود چشمه و برآورد حجم جریان پایه و سریع، نشان دهنده حاکم بودن جریان افشان کاذب موجود در منطقه بوده است. تغییرات هیدروگراف و پاسخ چشمه به بارندگی‌ها حاکی از وجود حداقل یک یا چند مجرای بزرگ و کاندویتی در نزدیک سطح ایستابی آبخوان است که می‌تواند در شرایط وجود بارندگی‌های قابل توجه پاسخ‌های سریع از چشمه مشاهده کرد. بررسی هیدروگراف و کموگراف، نیز مؤید توسعه متوسط تا زیاد مجاری زهکشی درونی آبخوان می‌باشد. بنابراین گرچه هر دو روش سطحی و زیرسطحی قابلیت بیان توسعه کارست را دارند، اما نمی‌توان صرفاً به برداشت‌های سطحی اکتفا کرد و از تجزیه و تحلیل هیدروگراف و کموگراف صرف‌نظر نمود.

کلمات کلیدی: توسعه سطحی کارست، توسعه زیرسطحی کارست، GIS، RS، هیدروگراف و کموگراف، چشمه علی دامغان

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- بیان مسئله ۱
- ۲-۱- هدف مطالعه ۲
- ۳-۱- موقعیت جغرافیایی و راههای ارتباطی منطقه مورد مطالعه ۴
- ۴-۱- ژئومورفولوژی منطقه ۵
- ۵-۱- آب و هوای منطقه ۶
- ۶-۱- زمین شناسی منطقه ۱۰
- ۷-۱- چینه شناسی منطقه ۱۲
- ۸-۱- تکتونیک منطقه ۲۰
- ۹-۱- هیدروژئولوژی منطقه ۲۴
- ۱۰-۱- هیدروژئولوژی منطقه ۲۷

فصل دوم: تاریخچه مطالعات انجام شده

- ۱-۲- مقدمه‌ای در مورد کارست ۲۹
- ۲-۲- سفره‌های کارستی و عوامل موثر بر توسعه در آن ۳۰
- ۳-۲- انواع سفره‌های کارستی ۳۳
- ۴-۲- عوامل موثر در توسعه کارست ۳۶
- ۴-۲- ۱- آب و هوا و اقلیم ۳۶
- ۴-۲- ۱-۱- بارش ۳۷
- ۴-۲- ۱-۲- دما ۳۷
- ۴-۲- ۱-۳- فشار گاز دی اکسیدکربن (CO_2) ۳۸

۳۸	..... زمین‌شناسی ۲-۴-۲
۳۸	..... لیتولوژی ۱-۲-۴-۲
۳۹	..... جایگاه چینه شناسی ۲-۲-۴-۲
۳۹	..... عوامل تکتونیکی (درزه و شکاف، گسل، چین خوردگی) ۳-۴-۲
۴۰	..... درزه و شکستگی‌ها ۱-۳-۴-۲
۴۰	..... گسل‌ها ۲-۳-۴-۲
۴۰	..... چین خوردگی‌ها ۳-۳-۴-۲
۴۲	..... پوشش گیاهی ۴-۴-۲
۴۲	..... پوشش خاک ۵-۴-۲
۴۳	..... شیب ۶-۴-۲
۴۳	..... آبراهه‌ها ۷-۴-۲
۴۴	..... مروری بر مطالعات انجام شده با استفاده از سنجش از دور و GIS ۵-۲
۵۰	..... استخراج خطوطاره‌ها به روش سنجش از دور ۶-۲
۵۱	..... جریان آب زیرزمینی در کارست ۷-۲
۵۳	..... تاثیر عوامل ساختاری در جریان آب زیرزمینی در کارست ۱-۷-۲
۵۴	..... صفحه‌های لایه‌بندی ۱-۱-۷-۲
۵۸	..... چین خوردگی‌ها ۲-۱-۷-۲
۶۲	..... شاخص کارستی شدن ۸-۲
۶۲	..... شاخص کارستی شدن شکستگی‌ها ۱-۸-۲
۶۴	..... آنالیز هیدروگراف چشمه و منحنی‌های فرود ۲-۸-۲
۶۵	..... استفاده از روش Maillet برای آنالیز منحنی فرود چشمه ۱-۲-۸-۲
۶۷	..... استفاده از روش Mangin برای آنالیز منحنی فرود چشمه ۲-۲-۸-۲
۷۱	..... استفاده از هیدروگراف و کموگراف جهت بررسی توسعه کارست درونی ۳-۸-۲
۷۵	..... ارتباط کارست شدگی سطحی و عمقی ۹-۲

فصل سوم: روش انجام کار

- ۱-۳- مطالعات زمین‌شناسی ۷۹
- ۲-۳- مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی ۸۱
- ۱-۲-۳- نمونه برداری از آب چشمه ۸۱
- ۲-۲-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل نمونه برداری ۸۲
- ۳-۲-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ۸۵
- ۳-۳- تعیین حوضه آبرگیر چشمه ۸۵
- ۴-۳- تعیین حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه‌های کارستی (روش Mailliet) ۸۶
- ۵-۳- تعیین حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه‌های کارستی (روش Mangin) ۸۷
- ۶-۳- استفاده از روش سنجش از دور و GIS ۸۸
- ۱-۶-۳- سنجش از دور ۸۸
- ۱-۱-۶-۳- ترکیب رنگ (Color Composite) ۹۱
- ۲-۱-۶-۳- نسبت‌گیری (Ratioing) ۹۲
- ۳-۱-۶-۳- فیلترگذاری ۹۳
- ۲-۶-۳- سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ۹۴

فصل چهارم: تحلیل داده‌های ساختاری و پردازش‌های دورسنجی

- ۱-۴- توسعه کارست در حوضه آبرگیر چشمه علی با استفاده از RS و GIS ۹۶
- ۱-۱-۴- آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی ۹۷
- ۱-۱-۱-۴- لایه لیتولوژی ۹۷
- ۲-۱-۱-۴- لایه شیب ۱۰۰
- ۳-۱-۱-۴- لایه پوشش گیاهی ۱۰۱
- ۴-۱-۱-۴- لایه دما ۱۰۳
- ۵-۱-۱-۴- لایه بارش ۱۰۴

- ۱-۱-۴-۶- لایه فاصله از آبراهه‌ها ۱۰۵
- ۱-۱-۴-۷- لایه فاصله از خطوطاره‌ها و گسل‌ها ۱۰۶
- ۱-۱-۴-۸- لایه تراکم خطوطاره‌ها و گسل‌ها ۱۰۹
- ۲-۱-۴-۲- هم مقیاس‌سازی لایه‌های اطلاعاتی و اهمیت آن ۱۱۰
- ۳-۱-۴-۳- وزن دهی لایه‌های اطلاعاتی ۱۱۲
- ۲-۴-۲- شاخص کارست‌شدگی شکستگی‌های حوضه آبگیر چشمه‌علی ۱۱۸

فصل پنجم: تحلیل داده‌های هیدروژئولوژیکی

- ۱-۵-۱- تعیین مساحت حوضه آبگیر چشمه‌علی ۱۲۵
- ۲-۵-۲- تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه ۱۲۷
- ۱-۲-۵-۱- تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکی چشمه علی ۱۲۷
- ۲-۲-۵-۲- تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و آبدهی چشمه ۱۳۲
- ۳-۲-۵-۳- تغییرات زمانی دما و آبدهی چشمه ۱۳۳
- ۳-۵-۳- برآورد ضریب آبدهی چشمه به روش مایلت و مانجین ۱۳۴
- ۱-۳-۵-۱- برآورد ضریب آبدهی چشمه و ذخیره دینامیک به روش مایلت (Maillet) ۱۳۴
- ۲-۳-۵-۲- بررسی منحنی فرود و حجم ذخیره دینامیک به روش مانجین (Mangin) ۱۳۶
- ۴-۵-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و تجزیه و تحلیل آن‌ها ۱۳۷
- ۵-۵-۵- تغییرات زمانی ضرایب اشباع‌شدگی و سایر پارامترهای محاسبه شده ۱۳۹
- ۶-۵-۶- بررسی ضرایب توسعه درونی کارست به روش هیدروگراف و کموگراف ۱۴۲
- ۷-۵-۷- نقش تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت‌یابی جریان آب زیرزمینی ۱۴۵
- ۸-۵-۸- توسعه سطحی و درونی کارست در حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان ۱۵۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۵۳ ۱-۶- نتیجه گیری

۱۵۶ ۲-۶- پیشنهادها

۱۵۷ منابع

فهرست تصاویر

- شکل ۱-۱- موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن ۴
- شکل ۲-۱- نمایی از دریاچه جنوبی، عمارت فتحعلی شاه قاجار و ارتفاعات مشرف به چشمه علی ۴
- شکل ۳-۱- تصویر سه بعدی ارتفاعات مشرف به چشمه علی دامغان (برگرفته از نرم افزار Google earth) ۵
- شکل ۴-۱- درصد فراوانی دسته های ارتفاعی حوضه آبرگیر چشمه علی ۶
- شکل ۵-۱- منحنی هیپسومترى و ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه علی ۶
- شکل ۶-۱- رابطه بارندگی- ارتفاع ایستگاه های باران سنجی دامنه جنوبی البرز در شمال استان سمنان ۷
- شکل ۷-۱- رابطه دما - ارتفاع در ایستگاه های تبخیر سنجی شمال استان ۹
- شکل ۸-۱- پهنه‌های رسوبی ساختاری عمده‌ی ایران ۱۱
- شکل ۹-۱- نقشه زمین‌شناسی و واحدهای سنگ چینه‌ای منطقه مورد مطالعه ۱۲
- شکل ۱۰-۱- ماسه سنگ‌های شمشک در یال جنوبی تاقدیس شمالی چشمه علی ۱۳
- شکل ۱۱-۱- آهک های مارنی دلیچای با لایه بندی منظم در تاقدیس چشمه علی ۱۴
- شکل ۱۲-۱- آثار وجود چشمه های کوچک و موقتی در آهک های دلیچای ۱۵
- شکل ۱۳-۱- رخنمونی از آهک‌های سازند لار ۱۶
- شکل ۱۴-۱- آهک های کرتاسه در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۱۷
- شکل ۱۵-۱- رخنمون‌های از واحد فجن پایینی در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۱۸
- شکل ۱۶-۱- رخنمون های از واحد PgfC سازند فجن در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۱۸
- شکل ۱۷-۱- رخنمون های از توف های کرج در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۱۹
- شکل ۱۸-۱- گسل چشمه علی دامغان ۲۳
- شکل ۱۹-۱- رخنمونی از گسل موجود در فاصله ۸۰۰ متری پایین دست چشمه‌علی ۲۴
- شکل ۲۰-۱- نمایی از بستر رودخانه آستانه (سلطان میدان- شورتنگه) در اردیبهشت ماه، دید به سمت شرق ۲۶

- شکل ۱-۲- ایجاد شکستگی در لایه ها همراه با چین خوردگی ۴۱
- شکل ۲-۲- نقش صفحه های لایه بندی و شکستگی ها بر جریان آب زیرزمینی در منطقه غیر اشباع ۵۴
- شکل ۳-۲- تاثیر کنترل چینه شناسی بر جریان آب زیرزمینی ۵۶
- شکل ۴-۲- تاثیر چین خوردگی سفره های کارستی با کنترل چینه شناسی بالا در جریان های سطحی و زیرزمینی ۵۶
- شکل ۵-۲- مدل جریان های آب زیرزمینی در تاقدیس های زاگرس ۵۸
- شکل ۶-۲- عملکرد یک گسل نرمال در شرایط بسته یا باز بودن صفحه گسلی در جریان های زیرزمینی ۵۹
- شکل ۷-۲- حالت های مختلف تاثیر گسل در جریان های زیرزمینی ۶۱
- شکل ۸-۲- رژیم های مختلف تخلیه آب در چشمه Ombra ۶۷
- شکل ۹-۲- اجزاء منحنی فرود در روابط Mangin ۶۸
- شکل ۱۰-۲- تغییر در ضریب α در شرایط مختلف شبکه کارستی ۷۲
- شکل ۱۱-۲- تغییر در مقدار α با تغییر در غلظت انحلالی ۷۴
- شکل ۱۲-۲- ارتباط خطی بین α و نسبت $\frac{AVR}{AFP}$ ۷۴
- شکل ۱۳-۲- دیاگرام تئوری های رایج تشکیل غار و مجاری بزرگ زیرزمینی ۷۶
- شکل ۳-۱- خروجی اصلی چشمه و محل نمونه گیری ۸۳
- شکل ۳-۲- محل اندازه گیری آبدهی چشمه ۸۳
- شکل ۳-۳- تقسیم بندی طیف امواج الکترومغناطیسی ۹۱
- شکل ۴-۳- مفهوم ترکیب رنگ در سیستم RGB ۹۲
- شکل ۱-۴- مراحل تهیه مدل توسعه کارست ۹۸
- شکل ۲-۴- تصویر ترکیب رنگی باندها ۷، ۴ و ۲ ماهواره لندست ۹۹
- شکل ۳-۴- لایه لیتولوژی حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۹۹
- شکل ۴-۴- نقشه شیب در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۱۰۱
- شکل ۵-۴- پوشش گیاهی تنک و متوسط، دید شرق ۱۰۲
- شکل ۶-۴- پوشش تنک و خیلی تنک، دید جنوب ۱۰۲
- شکل ۷-۴- نقشه پوشش گیاهی در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۱۰۲

- شکل ۴-۸- نقشه لایه هم دما در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۰۳
- شکل ۴-۹- نقشه لایه هم بارش در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۰۴
- شکل ۴-۱۰- نقشه فاصله از آبراهه ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۰۶
- شکل ۴-۱۱- نقشه خطواره های استخراج شده و دیاگرام گل سرخی مربوط به آن ۱۰۷
- شکل ۴-۱۲- نقشه لایه فاصله از خطواره ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۰۸
- شکل ۴-۱۳- نقشه گسل های منطقه مورد مطالعه و دیاگرام گل سرخی مربوط به آن ۱۰۸
- شکل ۴-۱۴- نقشه لایه فاصله از گسل ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۰۹
- شکل ۴-۱۵- نقشه تراکم خطواره ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۱۰
- شکل ۴-۱۶- نقشه تراکم گسل ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۱۰
- شکل ۴-۱۷- نقشه اولیه توسعه کارست ۱۱۵
- شکل ۴-۱۸- لایه اطلاعاتی جدا سازی مناطق کارستی از غیر کارستی ۱۱۶
- شکل ۴-۱۹- نقشه نهایی توسعه کارست در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۱۷
- شکل ۴-۲۰- شکستگی های مشاهده شده در دو ایستگاه اندازه گیری مختلف ۱۱۹
- شکل ۴-۲۱- نمودار گل سرخی امتدادی و شیبی شکستگی های اندازه گیری شده ۱۲۰
- شکل ۵-۱- محدوده حوضه آبخیز چشمه علی دامغان ۱۲۶
- شکل ۵-۲- هیدروگراف چشمه علی از آذر ماه ۱۳۸۹ تا مهر ماه ۱۳۹۰ ۱۲۹
- شکل ۵-۳- میانگین بارندگی سالانه نزدیک ترین ایستگاه بارندگی (ایستگاه آستانه) به چشمه علی ۱۳۰
- شکل ۵-۴- توزیع بارندگی و تغییرات دبی سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ ۱۳۱
- شکل ۵-۵- توزیع بارندگی و تغییرات دبی سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ ۱۳۲
- شکل ۵-۶- تغییرات هدایت الکتریکی و دبی چشمه علی ۱۳۳
- شکل ۵-۷- تغییرات زمانی دما و آبدهی چشمه علی ۱۳۴
- شکل ۵-۸- منحنی فرود چشمه علی در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ ۱۳۵
- شکل ۵-۹- منحنی فرود چشمه علی بر اساس معادلات مانجین از ششم اردیبهشت تا چهاردهم مهر ماه ۱۳۹۰ ۱۳۷

- شکل ۵-۱۰- تغییرات زمانی کاتیون‌ها ۱۳۹
- شکل ۵-۱۱- تغییرات زمانی آنیون‌ها ۱۳۹
- شکل ۵-۱۲- تغییرات شاخص اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس در طی نمونه‌برداری ۱۴۱
- شکل ۵-۱۳- رابطه بین غلظت کل املاح جامد محلول و دبی چشمه‌علی در مرحله فروکش آن ۱۴۳
- ۵-۱۴- مقایسه توسعه درونی آبخوان چشمه‌علی با پنج چشمه مذکور در سوئیس ۱۴۴
- شکل ۵-۱۵- مقطع زمین‌شناسی در راستای AB از سازندهای موجود در حوضه آبگیر ۱۴۷
- شکل ۵-۱۳- ترسیم استریوگرافیک شیب یال‌های چین خوردگی منطقه ۱۴۸
- شکل ۵-۱۴- مقایسه نتایج آنالیز آب چشمه و چاه موجود در یال جنوبی تاقدیس جنوبی چشمه‌علی ۱۴۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- مشخصات ایستگاه های باران سنجی شمال استان سمنان ۸
- جدول ۱-۲- طبقه بندی اقلیمی بر اساس رابطه دمارتن ۹
- جدول ۱-۲- رده بندی مهندسی انواع کارست ۳۵
- جدول ۱-۲- وضعیت کارستی شدن بر اساس شاخص کارستی شدن شکستگی ها ۶۴
- جدول ۲-۲- درجه کارستی حوضه آبرگیر چشمه های کارستی با استفاده از ضرایب منحنی فرود ۷۰
- جدول ۱-۳- نمونه ای از جدول های مورد استفاده در برداشت های صحرایی ۸۰
- جدول ۲-۳- برخی از فیلترهای جهتی استفاده شده جهت استخراج شکستگی ها ۹۴
- جدول ۱-۴- درصد مساحت بازه های شیب ۱۰۰
- جدول ۲-۴- ارزش های داده شده در لایه های اطلاعاتی ۱۱۱
- جدول ۳-۴- نمونه ی جدول AHP ارائه شده به کارشناسان ۱۱۳
- جدول ۴-۴- مقدار وزن لایه های اطلاعاتی به دست آمده به روش AHP ۱۱۴
- جدول ۴-۵- درصد و مساحت نواحی مختلف توسعه کارست در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان ۱۱۸
- جدول ۴-۶- مشخصات شکستگی ها در ایستگاه های مختلف اندازه گیری ۱۲۲
- جدول ۱-۵- مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده در محل چشمه ۱۲۸
- جدول ۲-۵- مقایسه ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکی چشمه علی در دو سال آبی متفاوت ۱۲۹
- جدول ۳-۵- مقادیر غلظت اندازه گیری شده یون های اصلی ۱۳۸
- جدول ۴-۵- درصد خطای نمونه های آزمایشگاه ۱۳۸
- جدول ۵-۵- محاسبه برخی پارامترهای آماری چشمه علی ۱۴۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- بیان مسئله

با افزایش جمعیت و افزایش نیازهای آبی، ضرورت و اهمیت منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از مهمترین منابع تامین کننده آب شیرین، بیش از پیش آشکار می‌شود. اهمیت سفره های کارستی از آنجا مشخص می شود که این سفره ها حدود ۲۵ درصد از آب شرب جمعیت جهان را فراهم می کنند (Ford and Williams, 2007). استفاده روز افزون و بی‌رویه از آبخوان های آبرفتی و افت سطح آب در این آبخوان ها، باعث شده است که جستجو برای یافتن سایر منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت و کارستی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. امروزه اکتشاف و بهره برداری از منابع آب موجود در آبخوان- های کارستی به لحاظ نیاز مبرم تأمین آب شرب شهرها و کیفیت مطلوب این منابع در مقایسه با منابع آب آبرفتی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در کشور ما یکی از مهم ترین مناطق جهت تامین آب مورد نیاز، مناطق کارستی است. لذا مطالعه و پی جویی منابع جدید و مطمئن آب کارستی از اهمیت بالایی برخوردار است.

جهت اکتشاف اولیه مناطق دارای پتانسیل بیشتر آب زیرزمینی در نواحی کارستی، می بایست از نمایانگرهای سطحی و پارامترهای موثر بر کارست شدگی استفاده نمود. پتانسیل یابی آب زیرزمینی نیاز به جمع آوری حجم عظیمی از داده های مکانی از منابع مختلف و همچنین مدیریت و تجزیه و تحلیل این داده ها دارد. در این راستا می توان از توانایی های سنجش از دور (Remote Sensing) برای پردازش (Processing) تصاویر ماهواره ای منطقه و تهیه داده ها استفاده نمود و از سیستم

اطلاعات جغرافیایی (Geographic Information System) به عنوان ابزاری توانمند در ذخیره، تجزیه و تحلیل، بازیابی، به روز رسانی و نمایش اطلاعات بهره گرفت.

منطقه مورد مطالعه حوضه آبرگیر چشمه علی در شمال شهر دامغان واقع در زون البرز شرقی است. این چشمه بزرگترین چشمه کارستی منطقه است که دارای جاذبه‌های گردشگری می‌باشد. کرمی (۱۳۸۳) با مطالعه خصوصیات کمی و کیفی این چشمه در سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ و تغییرپذیری اندک کلیه خواص فیزیکی و شیمیایی آب چشمه، و هم‌چنین عدم وجود پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مهم کارستی از قبیل گودی‌های مسدود، فروچاله‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌های انحلالی بزرگ و عمیق بیان نموده که سیستم غالب جریان آب زیرزمینی در آبخوان چشمه‌علی از نوع سیستم افشان است. در مطالعه حاضر توسعه سطحی کارست با استفاده از GIS و RS و توسعه درونی با ادامه مطالعات هیدروژئوشیمیایی موجود (کرمی، ۱۳۸۳) و به بررسی امکان ارتباط بین توسعه سطحی و زیرسطحی کارست در حوضه آبرگیر این چشمه پرداخته می‌شود.

۱-۲- هدف مطالعه

عوامل متعددی در توسعه کارست دخیل می‌باشند که شامل، زمین‌شناسی، تکتونیک، بارندگی، دما و ... می‌باشد. اثر این عوامل از زمان تشکیل یک لایه رسوبی تا به امروز بر نحوه توسعه عوارض سطحی و داخلی کارست تاثیر می‌گذارند. همواره مطالعات انجام شده در این زمینه از دو منظر کاملاً متفاوت بوده است در دیدگاه اول کسانی همانند (Aloui and Chaabani, 2006)، با استفاده از شواهد سطحی به ارزیابی توسعه کارست پرداخته‌اند، این مطالعات عمدتاً با انجام بازدیدهای صحرایی و نظرات کارشناسی همراه بوده است. گرچه امروزه با استفاده از روشهای سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور تلاش می‌شود اطلاعات وسیعی بدست آید. در دیدگاه دوم کسانی چون (Bonacci, 1993; Malik, 2006; Alessandro Grasso et al, 2002) با استفاده از هیدروگراف چشمه و آنالیز تغییرات شیمیایی چشمه به دنبال معرفی فاکتوری بنام اندیس توسعه کارست بوده‌اند.

در ایران بررسی عوامل موثر در توسعه کارست با استفاده از روش سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور توسط محققین مختلف صورت پذیرفته است که عمده مطالعات مزبور در زون ساختاری زاگرس متمرکز بوده است که شامل (عبادیان، ۱۳۸۱؛ شفیع، ۱۳۸۲؛ اشجار، ۱۳۸۳؛ غیثی، ۱۳۸۷؛ دشتی، ۱۳۸۹) اشاره کرد. جلالی (۱۳۸۳) نیز در محدوده سد لار با استفاده از روش سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در جهت مشخص کردن عوامل ژئومورفولوژیکی سطحی قدم برداشته است. در هیچ یک از مطالعات مزبور به بررسی ارتباط احتمالی توسعه کارست سطحی و درونی پرداخته نشده است. هدف این رساله تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور جهت بررسی توسعه کارست سطحی و درونی می‌باشد. لازم به ذکر است که بررسی توسعه کارست ارتباط احتمالی توسعه کارست سطحی و درونی می‌باشد. لازم به ذکر است که بررسی توسعه کارست سطحی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور همانند دیگر محققین انجام می‌پذیرد و توسعه کارست درونی عمدتاً با معرفی اندیس‌های کارستی شدن از طریق هیدروگراف چشمه انجام می‌گیرد.

۱-۳- موقعیت جغرافیایی و راههای ارتباطی منطقه مطالعه

چشمه‌علی که نام اصلی آن بنا به نوشته مورخین علی بولاغ است در ۳۲ کیلومتری شمال غربی شهر دامغان قرار گرفته است که از طریق جاده آسفالته دامغان-کیاسر- ساری قابل دسترسی می‌باشد (شکل ۱-۱). این منطقه از نظر تقسیمات زمین شناسی در البرز شرقی و از لحاظ تقسیمات جغرافیایی در حوضه دهستان رودبار قرار دارد. چشمه و حوضه آبگیر آن در مختصات جغرافیایی $۵۳^{\circ}۴۱'$ تا $۵۴^{\circ}۱۵'$ طول شرقی و $۳۶^{\circ}۰۶'$ تا $۳۶^{\circ}۲۴'$ عرض شمالی واقع شده است. مجموعه چشمه‌علی دارای دو دریاچه جنوبی و شمالی می‌باشد که عمارت آغا محمد خان قاجار در قسمت جنوبی دریاچه و عمارت فتحعلی شاه در حدواسط دو دریاچه واقع شده است (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۱- موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه و راه های دسترسی به آن (نقشه سازمان نقشه برداری)



شکل ۱-۲- نمایی از دریاچه جنوبی، عمارت فتحعلی شاه قاجار و ارتفاعات مشرف به مجموعه چشمه علی

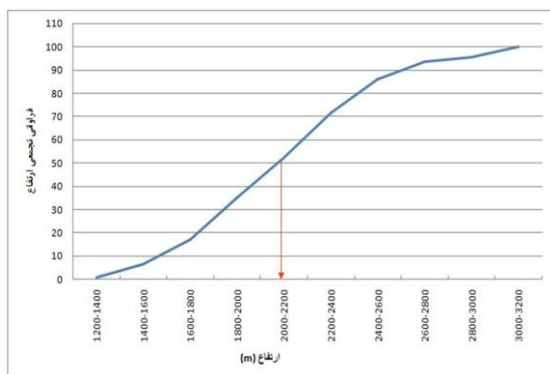
۱-۴- ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

به طور کلی محدوده مطالعاتی، ارتفاعات جنوبی دامنه های البرز را شامل می‌شوند که به سمت جنوب از ارتفاع آن کاسته شده و در نهایت به کویر حاج علیقلی ختم می‌شود. از نظر ژئومورفولوژی، ارتفاعات شمالی چشمه‌علی دارای دو تیپ کوهستانی همراه با دشت آبرفتی کوچکی در حدواسط آن می‌باشد. ارتفاع کوه‌های شمالی حدود ۱۲۰۰ متر بلندتر از کوه‌های جنوبی می‌باشد (شکل ۱-۳). ارتفاعات موجود به سمت چشمه، تیپ تپه ماهوری گرفته و در نهایت به آبرفت‌های بالا دست چشمه ختم می‌شود. این منطقه فاقد پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مهم کارستی از قبیل گودی‌های مسدود، فروچاله‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌های انحلالی بزرگ و عمیق است (کرمی، ۱۳۸۳). بازدیدهای صحرائی در برخی نواحی آثار قطرات باران، شکستگی‌های کم و بیش بزرگ، حفرات لانه کبوتری و کارن را نشان می‌دهد.

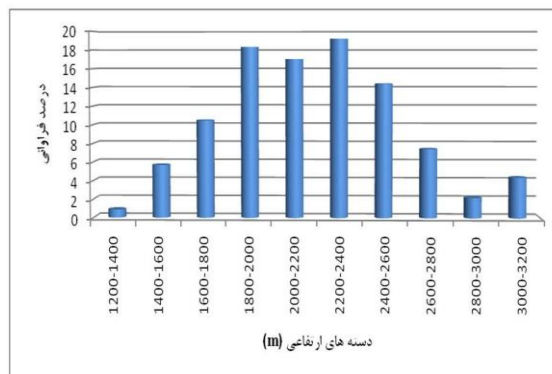


شکل ۱-۳- تصویر سه بعدی ارتفاعات مشرف به چشمه علی دامغان (برگرفته از نرم افزار Google earth)

با استفاده از اطلاعات رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه، دسته‌بندی ارتفاعات حوضه در دسته‌های ۲۰۰ متری انجام شد (شکل ۱-۴). بر این اساس ارتفاعات ۱۸۰۰ تا ۲۶۰۰ متری بیشترین فراوانی را دارند. جهت محاسبه ارتفاع متوسط حوضه، دسته‌های ارتفاعی در مقابل فراوانی تجمعی آن‌ها ترسیم گردید. ارتفاعی که ۵۰ درصد فراوانی تجمعی را شامل شود ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر می‌باشد (شکل ۱-۵) با توجه به این شکل ارتفاع ۲۱۰۰ متری ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان می‌باشد.



شکل ۱-۵- منحنی هیپسومتری و ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه علی

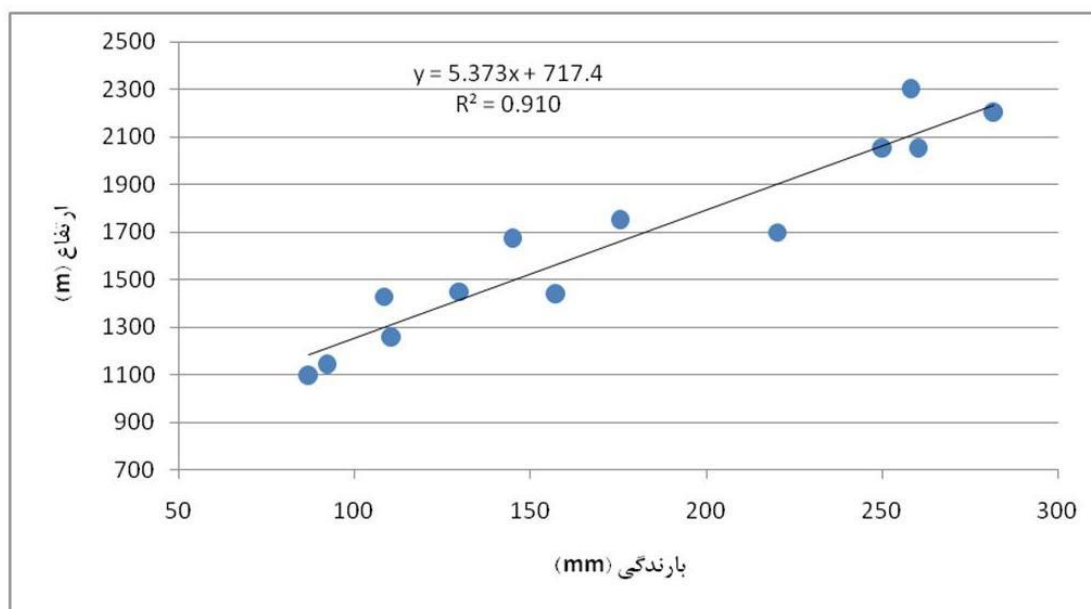


شکل ۱-۴- درصد فراوانی دسته های ارتفاعی حوضه آبرگیر چشمه علی

۵-۱- آب و هوای منطقه مورد مطالعه

به طور کلی آب و هوا و اقلیم جنوب استان، خشک و کویری بوده و به سمت شمال استان بر مقدار بارندگی‌ها افزوده می‌شود. منطقه مورد مطالعه در شمال دامغان و دامنه‌های جنوبی البرز واقع شده و دارای زمستانهای نسبتاً سرد و تابستانهای معتدل می‌باشد. قسمت اعظم بارش‌ها در حوضه آبرگیر چشمه‌علی به صورت برف می‌باشد، شیب‌های رو به شمال در بیشتر روزهای اواخر پاییز و فصل زمستان همراه با پوشش برف می‌باشد (کرمی، ۱۳۸۳). نزدیک ترین ایستگاه باران سنجی به مجموعه چشمه‌علی، ایستگاه باران سنجی آستانه با ارتفاع ۱۴۵۰ متر از دریا می‌باشد. از آنجا که با تغییر ارتفاع مقدار بارندگی هم تغییر می‌یابد لذا به منظور محاسبه میانگین بارندگی و دمایی که معرف

متوسط ارتفاع حوضه آبخیز چشمه‌علی باشد از رابطه ارتفاع با میانگین بارندگی و دمای ایستگاه‌های موجود در سطح استان استفاده شده است. انتخاب ایستگاه‌های مورد استفاده به گونه‌ای می‌باشد که نواحی شمالی استان و دامنه‌های جنوبی البرز را پوشش می‌دهند. جهت محاسبه میانگین بارندگی که معرف متوسط ارتفاع حوضه آبخیز باشد از میانگین بارندگی ۲۰ ساله، ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی و جهت محاسبه میانگین دمایی که معرف متوسط ارتفاع حوضه آبخیز باشد از داده‌های ۷ ایستگاه تبخیر-سنجی در همان دوره زمانی استفاده شده است. مشخصات ایستگاه‌های مذکور در (جدول ۱-۱) ارائه شده است. با ترسیم مقادیر بارندگی در برابر ارتفاع (شکل ۱-۶) و دما در برابر ارتفاع (شکل ۱-۷) مقادیر بارندگی و دمای حوضه آبخیز چشمه‌علی برآورد شده است. با توجه به شکل (۱-۶) میانگین بارندگی حوضه آبخیز چشمه‌علی ۲۵۷ میلی‌متر در سال برآورد شده است. لازم به ذکر است در این شکل به دلیل برابر بودن ارتفاع و میانگین بارندگی دو ایستگاه آستانه و صح، به صورت یک نقطه همانند مشخص شده است.



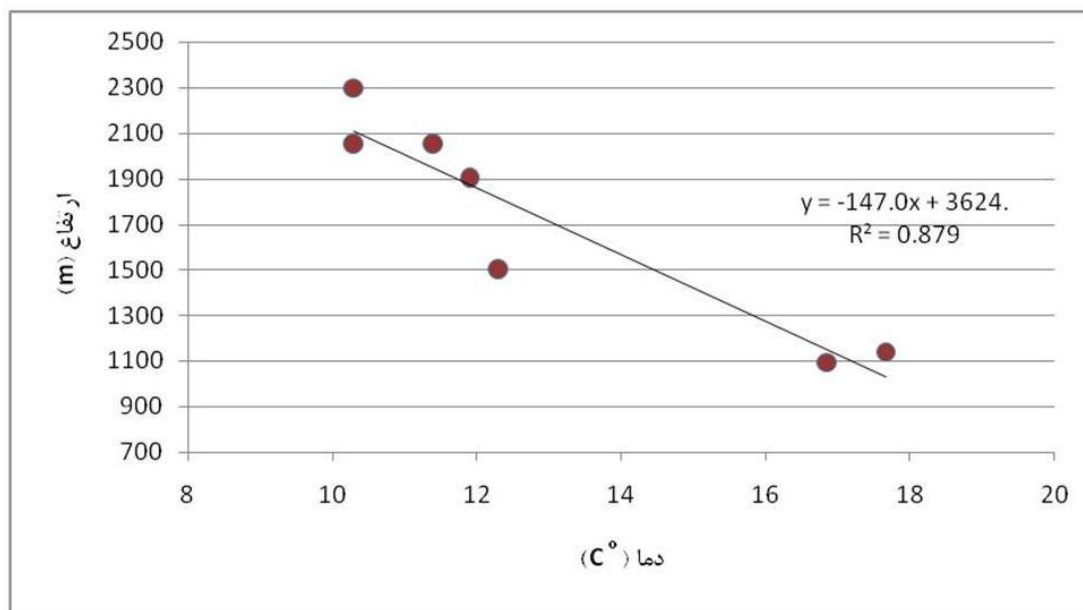
شکل ۱-۶- رابطه بارندگی- ارتفاع ایستگاه‌های باران سنجی دامنه جنوبی البرز در شمال استان سمنان

جدول ۱-۱- مشخصات ایستگاه های باران سنجی شمال استان سمنان^۱

نام ایستگاه	طول	عرض	ارتفاع از دریا (m)	میانگین بارندگی (mm/y)	میانگین تبخیر سالانه (mm)	میانگین دما سالانه (C°)
بسطام	۵۴°۵۸'۵۷"	۳۶°۲۸'۱۲"	۱۴۳۶	۱۵۷/۵	۱۷۹۰	۱۲/۳
مجن	۵۴°۳۹'۰۱"	۳۶°۲۸'۳۷"	۲۰۵۰	۲۶۰/۲	۱۴۶۰	۱۰/۳
ده صوفیان	۵۳°۲۳'۴۳"	۳۵°۴۹'۰۵"	۲۳۰۰	۲۸۵/۲	۱۶۰۰	۱۰/۳
شهمیرزاد	۵۳°۲۰'۴۲"	۳۵°۴۶'۲۷"	۲۰۵۰	۲۵۰/۲	۱۵۹۱/۱	۱۱/۴
پژوهشی سمنان	۵۳°۲۵'۴۶"	۳۵°۳۵'۵۸"	۱۱۴۰	۱۲۸/۹۲	۲۸۹۹	۱۷/۷
خیر آباد سمنان	۵۳°۲۵'۱۱"	۳۵°۳۲'۲۷"	۱۰۹۵	۱۳۶/۸۷	۲۳۹۵/۶	۱۶/۹
دیباچ	۵۴°۱۳'۱۱"	۳۶°۲۵'۰۱"	۱۶۷۰	۱۴۵/۱	۱۵۳۱/۳	۱۱/۹
آستانه	۵۴°۰۶'۰۰"	۳۶°۱۶'۰۸"	۱۴۵۰	۱۲۹/۵	-	-
خیج	۵۵°۱۹'۴۲"	۳۶°۳۹'۲۶"	۱۴۳۰	۱۰۸/۴	-	-
صح	۵۳°۵۵'۴۰"	۳۵°۵۴'۴۰"	۱۴۵۰	۱۲۹/۸	-	-
ابرسیج	۵۴°۵۵'۲۰"	۳۶°۳۴'۵۹"	۱۷۵۰	۱۷۵/۵	-	-
تاش سفلی	۵۴°۴۰'۲۷"	۳۶°۳۳'۳۲"	۲۲۰۰	۲۸۲	-	-
رویان شاهرود	۵۵°۰۰'۰۰"	۳۶°۲۱'۰۰"	۱۲۵۴	۱۱۰/۶	-	-
مهدیشهر	۵۳°۲۱'۰۷"	۳۵°۴۲'۴۸"	۱۷۰۰	۲۲۰/۲	-	-

شکل (۱-۷) رابطه دما در مقابل ارتفاع را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که دما با ارتفاع رابطه معکوس دارد. با توجه به ارتفاع متوسط حوضه آبخیز، متوسط دمای این حوضه ۱۰/۴ درجه سانتیگراد برآورد شده است.

^۱ - آمار و اطلاعات امور آب شهرستان دامغان، میانگین بارندگی، تبخیر و دمای دوره ۲۰ ساله ۱۳۶۸-۱۳۶۷ تا ۱۳۸۸-۱۳۸۷ می باشد.



شکل ۱-۷- رابطه دما - ارتفاع در ایستگاه های تخییر سنجی شمال استان

دمارتن (De Martonne) برای تعیین اقلیم فرمول زیر را پیشنهاد نموده است.

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

در معادله فوق P متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر و T متوسط دمای سالانه بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بر اساس طبقه‌بندی دمارتن شش نوع آب و هوا طبقه‌بندی شده‌اند (جدول ۱-۲).

جدول ۱-۲- طبقه بندی اقلیمی بر اساس رابطه دمارتن (نقل از علی زاده، ۱۳۸۷)

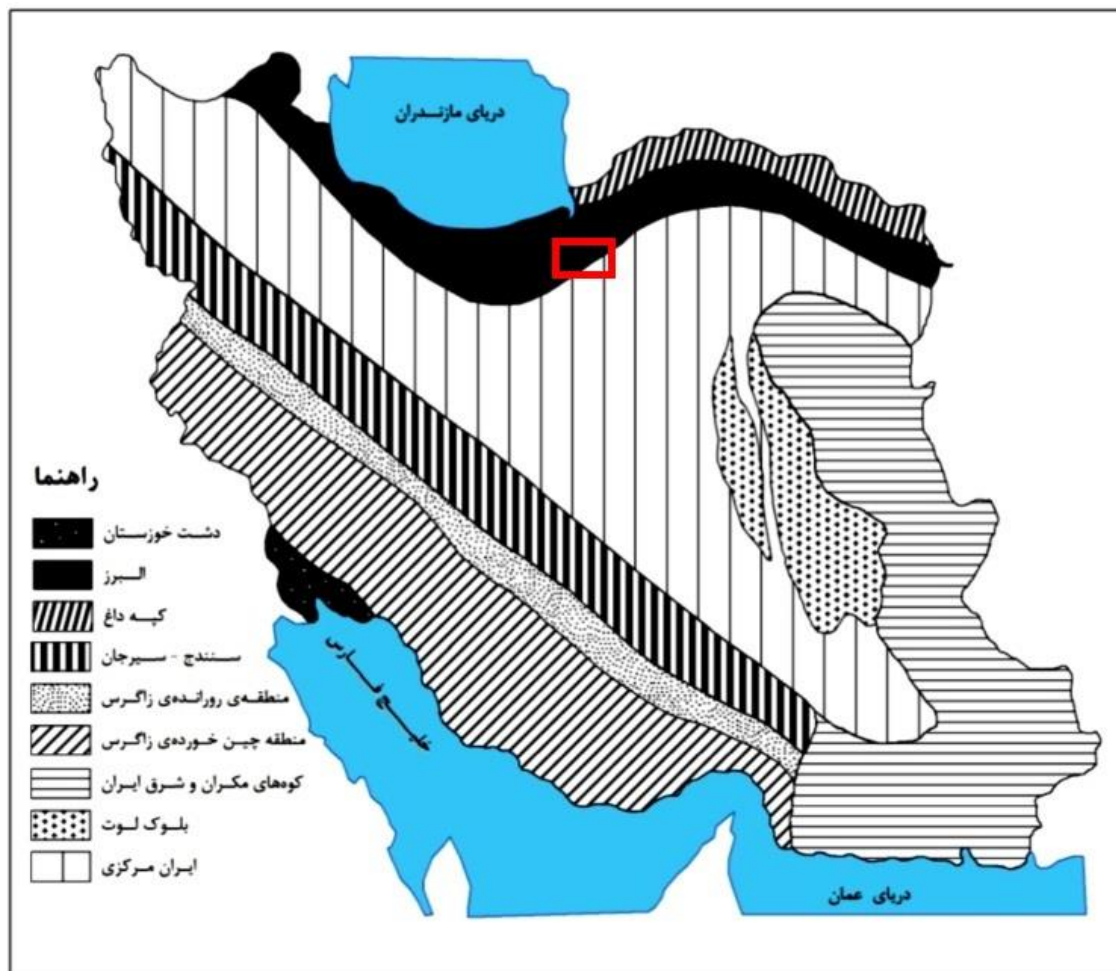
نام اقلیم	محدوده ضریب خشکی دمارتن (I)
خشک	کوچکتر از ۱۰
نیمه خشک	۱۰ تا ۱۹/۹
مدیترانه‌ای	۲۰ تا ۲۳/۹
نیمه مرطوب	۲۴ تا ۲۷/۹
مرطوب	۲۸ تا ۳۴/۹
بسیار مرطوب	بزرگتر از ۳۵

بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن منطقه مورد مطالعه آب و هوای نیمه خشک دارد.

۱-۶- زمین شناسی منطقه

اشتوکلین (Stocklin, 1968) ایران را به چند منطقه یا زون ساختمانی با وضعیت تکتونیکی و تاریخچه‌ی رسوبی متفاوت تقسیم کرد (شکل ۱-۸). کوه‌های البرز در شمال ایران به شیوه خمیده‌ای با طولی حدود ۲۰۰۰ کیلومتر از قفقاز در جمهوری ارمنستان و آذربایجان تا شمال افغانستان کشیده شده‌اند و ساختار آن بیشتر چین‌های ملایم و ناهمگنی با امتداد شرقی-غربی است. در بخش شرقی امتداد کلی، شمال شرقی-جنوب غربی و در بخش غربی شمال غربی-جنوب شرقی و البرز مرکزی محل همگرایی این دو امتداد است. بد نیست اشاره‌ای کنیم که آتشفشان دماوند در محل این همگرایی یعنی البرز مرکزی واقع شده است. استان سمنان در دامنه‌های جنوبی ارتفاعات البرز (مرکزی - شرقی) و حاشیه شمالی کویر بزرگ قرار می‌گیرد و از نگاه زمین‌شناسی به دو پهنه ساختاری البرز و ایران مرکزی تعلق دارد. حاشیه شمالی استان سمنان بخشی از دامنه جنوبی کوه-های البرز (مرکزی - شرقی) ولی حاشیه جنوبی بخشی از ایران مرکزی است. علوی نایینی (۱۹۷۲) و امیدی (۱۳۸۰) گسل عطاری را به عنوان حد جدا کننده البرز از ایران مرکزی معرفی کرده‌اند. در حالی که در شمال استان گسل سمنان حد جدا کننده البرز از ایران مرکزی معرفی شده است (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین). داده‌های منطقه‌ای و مقایسه ویژگی‌های زمین‌شناسی نواحی واقع در شمال (البرز) و جنوب (ایران مرکزی) گسل‌های سمنان و عطاری نشان می‌دهد که تفاوت‌های زمین‌شناسی چندان آشکاری بین بخش شمالی استان سمنان و بخش جنوبی آن وجود ندارد، به گفته دیگر بخش البرز استان سمنان در واقع چین‌های حاشیه‌ای ایران مرکزی هستند (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین). در البرز مرکزی- شرقی چین‌ها به صورت تاقدیس و ناودیس‌های باریک و طولی هستند که عموماً "پهلوی جنوبی آن‌ها در اثر عملکرد گسل‌های راندگی بریده شده و به سمت جنوب جابجا شده‌اند. عملکرد نسبتاً شدید راندگی‌ها، تکتونیک بلوکی و حوضه‌های رسوبی محدود به زون

های گسلی سبب به هم خوردگی نظم اولیه توالی‌ها و ضخامت واحدهای سنگ چینه‌ای هم سن و هم زمان شده است (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین).

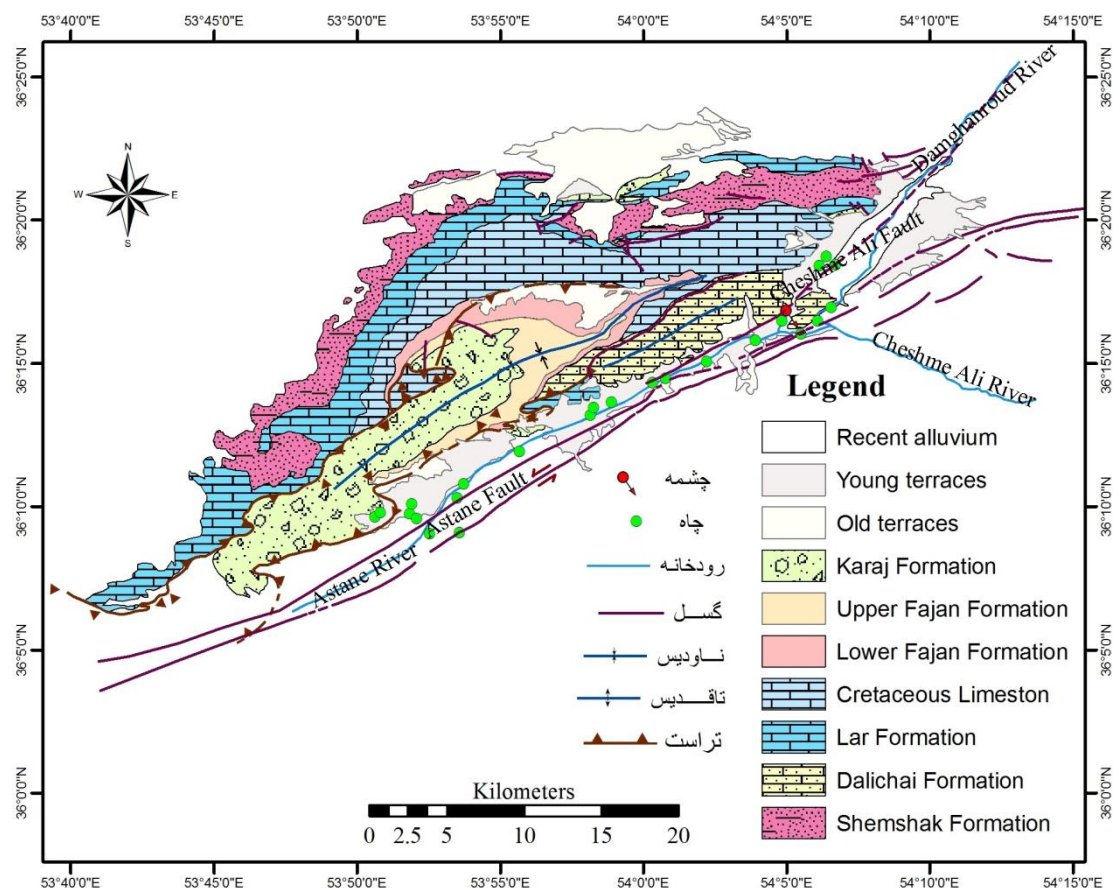


شکل ۱-۸- پهنه‌های رسوبی ساختاری عمده‌ی ایران (Stocklin, 1968). موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی این نقشه با علامت نشان داده شده است.

با توجه به موقعیت زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه در شمال استان و زون البرز (مرکزی-شرقی) واقع شده است. نیمه شرقی حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه دامغان (علوی و صالحی راد، ۱۹۷۵) و نیمه غربی در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه کیاسر (سعیدی و اکبر پور، ۱۳۷۱) قرار می‌گیرد.

۷-۱- چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه

با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، عکس‌های ماهواره‌ای و مشاهدات صحرایی واحدهای سنگ چینه‌ای موجود در منطقه مطالعاتی حوضه آبگیر چشمه‌علی سازندهای شمشک، دلیچای، لار، آهک-های کرتاسه، فجن، کرج و نهشته‌های کواترنری می‌باشند که به اختصار معرفی می‌شوند. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۹-۱ نشان داده شده است.



شکل ۹-۱- نقشه زمین‌شناسی و واحدهای سنگ چینه‌ای منطقه مورد مطالعه

– سازند شمشک

برش الگوی سازند شمشک در بالا دست دره روته در شمال گردنه لازیم واقع شده است. در محل برش الگو سازند شمشک به چهار زون سنگی تقسیم شده است که از پایین به بالا شامل ماسه سنگ پایینی، سری زغال‌دار پایینی، ماسه سنگ بالایی و سری زغال‌دار بالایی می‌باشد. سن این سازند

تریاس پسین تا ژوراسیک میانی (دوگر) است و ضخامت آن در برش الگو ۱۰۲۷ متر بوده ولی تغییرات جانبی ضخامت بسیار زیاد است (آقابات، ۱۳۸۵). این سازند به صورت دگرشیب بر روی بخش D از سازند جیروود (آهک های سیاه رنگ و مارن) و در زیر مارن های دلیچای قرار گرفته است. راد (۱۹۸۶) به نقل از مقدسی (۱۳۸۲) لیتولوژی شمشک را ماسه سنگ، سیلتستون، شیل های زغال-دار و عدسی های زغال سنگی و کنگلومرا معرفی کرده است.

در منطقه مورد مطالعه سازند شمشک بیشتر در یال جنوبی تاقدیس شمالی حوضه آبگیر رخنمون دارد لیتولوژی این سازند از ماسه سنگ های دانه ریز، متراکم و سخت همراه با مارن و گهگاه رخنمون-هایی از کنگلومرا در بعضی نواحی مشاهده شده است (شکل ۱-۱۰). درزه و شکستگی های این سازند اندک بوده و از نظر هیدروژئولوژی می توان گفت این رسوبات ماسه سنگی، شیلی و سیلت سنگی شمشک می تواند نقش لایه نفوذ ناپذیر برای رسوبات قدیمی تر و جدیدتر از خود را داشته باشند.



شکل ۱-۱۰-۱- ماسه سنگ های شمشک در یال جنوبی تاقدیس شمالی چشمه علی

– سازند دلیچای

نام این سازند از رودخانه دلیچای در نزدیکی جاده دماوند به فیروزکوه گرفته شده است. ضخامت برش الگو ۱۰۷ متر می باشد. سن این سازند ژوراسیک میانی (باژوسین - کالووین) و در برش الگو روی سازند شمشک و زیر آهک های لار قرار گرفته است. لیتولوژی این سازند شامل مارن و آهک های مارنی با

لایه بندی منظم و میان لایه هایی از شیل های مارنی می باشد، گاهی مارن بیشتر از سنگ آهک است (آقنابتی، ۱۳۸۵). سازند دلیچای در منطقه مورد مطالعه در یال جنوبی تاقدیس چشمه علی رخنمون دارد (شکل ۱-۹). با مشاهدات صحرایی انجام شده، لیتولوژی این سازند از آهک های تیره رنگ همراه با میان لایه های مارنی تشخیص داده شد (شکل ۱-۱۱). به طور کلی مارن های دلیچای ارتفاع کمتری نسبت به ستیغ سازهای آهک های کرتاسه و لار دارند.



شکل ۱-۱۱- آهک های مارنی دلیچای با لایه بندی منظم در تاقدیس چشمه علی

سازند دلیچای در بعضی مناطق به صورت توده ای همراه با خرد شدگی و شکستگی ها فراوان بوده، عوارض کارستی همانند آثار قطرات باران و لایه های انحلالی در سطح بلوک های از آهک های دلیچای مشاهده شده، و در بعضی مناطق حفره های لانه کبوتری به فراوانی مشاهده می شود. همچنین آثار وجود چشمه های بسیار کوچک موقتی که به دلیل شیب کلی لایه بندی و وجود شکستگی ها بوده به چشم می خورد (شکل ۱-۱۲). از نظر هیدروژئولوژی وجود مارن در آهک های دلیچای تا حدی از سرعت جریان آب زیرزمینی در این سازند می کاهد به گونه ای که می توان اینگونه پنداشت که وجود مجاری بزرگ و جریان با سرعت بیشتر آب زیرزمینی در سازندهای فوقانی (آهک های لار و کرتاسه) هنگام رسیدن به سازند دلیچای کاهش می یابد. قابل توجه نبودن تغییرات دبی چشمه علی و در کل سیستم افشان داشتن این چشمه می تواند به دلیل کاهش سرعت جریان آب زیرزمینی در سازند دلیچای باشد.



شکل ۱-۱۲- آثار وجود چشمه های کوچک و موقتی در آهک های دلیچای

- سازند لار

نام این سازند از دره لار در شمال شرق گرماب گرفته شده است. ضخامت آن ۲۵۰ تا ۳۵۰ متر ولی گاه در البرز شرقی به ۱۰۰۰ متر نیز می‌رسد. سن آهک های لار ژوراسیک بالایی (آکسفوردین-کیمرجین) که روی سازند دلیچای و زیر ژپس و ملافیرها یا آهک‌های کرتاسه زیرین قرار می‌گیرد. این سازند از آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای حاوی چرت و نوارهای سیلیسی تشکیل شده است (آقنابتی، ۱۳۸۵). سازند لار نیز در منطقه مورد مطالعه بیشتر در یال جنوبی تاقدیس شمالی چشمه برونزد دارد به طوریکه ارتفاعات ستیغ ساز حوضه را تشکیل داده و با پوشش متراکم درختان و بوته‌های وحشی پوشیده شده‌اند (شکل ۱-۱۳ الف و ب). سازند لار در حوضه آبگیر چشمه علی بر روی سازند شمشک و زیر سنگ آهک‌های کرتاسه قرار دارد. با مشاهدات صحرائی انجام شده لیتولوژی این سازند آهک‌های با بافت ریز دانه به رنگ کرم تا روشن بوده، در نمونه دستی رگه‌های از کلسیت نیز مشاهده می‌شد. خلوص بالای سنگ آهک‌های لار همراه با انحلال‌های شیمیایی سطحی سبب ایجاد لایه‌ها و شکاف‌های بزرگ با عمق زیاد در بلوک‌های برونزده آن شده است. مابین بلوک‌های شکسته شده را خاک و پوشش گیاهی پر می‌کنند (شکل ۱-۱۳ ب).



(ب) انحلال‌های سطحی موجود در ارتفاعات ۲۵۰۰ متری



(الف) آهک‌های لار در یال جنوبی تاقدیس شمالی با شیب به سمت SE، دید به سمت شمال شرق

شکل ۱-۱۳- رخنمونی از آهک‌های سازند لار

- آهک‌های کرتاسه

بیشترین ارتفاعات موجود در حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان را آهک‌های کرتاسه می‌سازند. این آهک‌ها بر روی سازند لار قرار گرفته و از نظر ژئومورفولوژی همانند لار ایجاد قله مرتفع و ستیغ‌های بلند در حوضه آبگیر نموده است و بیشتر در یال جنوبی تاقدیس شمالی و نیز قسمت‌های از یال شمالی تاقدیس جنوبی رخنمون دارد. این آهک‌ها دارای لایه‌بندی منظم و ضخیم می‌باشد و همانند آهک‌های لار دارای بافت ریز دانه، متراکم و سخت می‌باشد. ولی پوشش گیاهی آن خیلی کمتر از آهک‌های لار است (شکل ۱-۱۴). از نظر هیدروژئولوژی آهک‌های لار و کرتاسه هر دو با خلوص بالای خود و وجود درزه و شکاف‌های انحلالی، ریزش‌های جوی صورت گرفته را به سرعت نفوذ داده و منابع بزرگ آب زیرزمینی چشمه‌علی دامغان را تشکیل می‌دهند.



الف) آهک های کرتاسه در یال شمالی ناودیس، دید شمال شرقی
 ب) آهک های کرتاسه در یال جنوبی ناودیس، دید جنوب غربی

شکل ۱-۱۴- آهک های کرتاسه در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان

- سازند فجن

برش الگوی سازند فجن در صد کیلومتری شرق تهران نزدیک روستای فاجان است. ضخامت این سازند متغیر بوده ولی در برش الگو حدود ۱۵۰۰ متر اندازه گیری شده است. لیتولوژی این سازند شامل کنگلومرا، ماسه سنگ های سرخ رنگ و مارن های ماسه ای است. در برش الگو، سازند فجن به صورت دگرشیب سنگ آهک های کرتاسه زیرین (سازند تیز کوه) را می پوشاند و در بالا با سازند آهکی زیارت همشیب است. سن این سازند بر اساس جایگاه چینه شناسی پالئوسن - ائوسن تشخیص داده شده است. سازند کنگلومرای فجن نشانگر چرخه های فرسایشی پس از رویداد لارامین و تشکیل حوضه های رسوبی همزمان با کوهزایی سنوزوئیک است (آقناباتی، ۱۳۸۵). در منطقه مورد مطالعه این سازند مابین محور تاقدیس و ناودیس قرار گرفته است. با بازدیدهای صحرائی انجام شده لیتولوژی واحد فجن پایینی، کنگلومرا، ماسه سنگ و مارن های قرمز رنگ می باشد (شکل ۱-۱۵ الف و ب) اندازه دانه های کنگلومرا در حد خیلی ریز تا چندین سانتی متر و نسبتاً "گرد شده می باشند. زمینه کنگلومراها و ماسه سنگ های موجود از مارن های قرمز رنگ تشکیل شده است. این سازند نسبتاً "مقاوم بوده و از نظر هیدروژئولوژی وجود مارن در این سازند مانعی در جریان آب زیرزمینی می باشد. واحد فجن فوقانی کنگلومرای تحجر یافته فاقد مارن می باشد (شکل ۱-۱۶ الف و ب). اندازه دانه های کنگلومرا و مقاومت این واحد همانند فجن پایینی بوده است.



ب) سازند فجن و آهک های کرتاسه، دید به سمت



الف) کنگلومراهای قرمز رنگ فجن، دید به سمت

جنوب شرقی

شکل ۱-۱۵- رخنمون‌های از واحد فجن پایینی در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان



ب) کنگلومرای فجن در کنار دلیچای، تافدیس جنوبی

(دید جنوب)



الف) کنگلومرای بدون مارن واحد فجن فوقانی

(دید شرق)

شکل ۱-۱۶- رخنمون‌های از واحد Pgfc سازند فجن در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان

- سازند کرج

برش الگوی سازند کرج در دره کرج واقع شده است. لیتولوژی این سازند توف های سبز رنگ است که ضخامت آن در برش الگو ۳۳۰۰ متر می باشد. سازند کرج به ۵ عضو تقسیم می شود که از پایین به بالا شامل شیل زیرین، بخش توف میانی، بخش آسارا، بخش توف بالایی و شیل کندوان است اما در سایر نقاط البرز به دلیل تغییر ضخامت عضو بندی نمی شود (آقاناتی، ۱۳۸۵). این سازند در جنوب غربی حوضه رخنمون دارد (شکل ۱-۹). با مشاهدات صحرایی انجام شده این توف ها بسیار زاویه دار بوده که همراه با ماسه سنگ ها و قطعه های سنگ آهکی که آثار فرسایش بر روی آن ها مشهود می باشد در یک زمینه بسیار محکم و سفت قرار گرفته اند (شکل ۱-۱۷، الف). توده های این سازند نسبت به کنگلومراهای فجن بسیار سخت تر می باشند. وجود شکستگی های بزرگ در توده های این سازند نشان دهنده شکنندگی این سازند در اثر نیروهای تکتونیکی می باشد (شکل ۱-۱۷، ب). از نظر هیدروژئولوژی می توان گفت این سازند به دلیل استحکام زیاد، بجز شکستگی ها مذکور نمی تواند نفوذپذیری خوبی برای لایه های زیری خود داشته باشد.



ب) نمونه ای از شکستگی های بزرگ توف های کرج



الف) قطعات زاویه دار ماسه سنگ و آهکی سازند کرج

شکل ۱-۱۷- رخنمون های از توف های کرج در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان

– نهشته های کواترنری

نهشته‌های کواترنر منطقه مورد مطالعه حاصل پدیده هوازدگی، فرسایش و انتقال واحدهای سنگی- رسوبی قدیمی‌تر بوده، این نهشته‌ها بیشتر در دامنه‌های ارتفاعات، مخروطه افکنه‌ها و دشتهای سیلابی سیلابی رودخانه‌ها نهشته شده‌اند (شکل ۱-۹). که بیشتر از ماسه و سیلت با لایه‌بندی نازک تشکیل شده‌اند. این نهشته‌ها در نواحی بالادست چشمه‌علی با شیب حدود ۹ درجه به سمت جنوب شرقی نهشته شده‌اند.

۱-۸- تکتونیک منطقه

در بیشتر نواحی البرز، رسوبات پالئوزویک- تریاس میانی، به رغم نبوده‌های چینهای فراوان، هم شیب- اند که نشانگر حرکت‌های زمین‌ساختی از نوع زمین‌زا است. در تریاس پسین همزمان با رویداد کوهزایی سیمیرین پیشین، اگرچه رویداد ناشی از برخورد حاشیه قاره‌ای فعال و پویای توران با حاشیه قاره‌ای ناپویای البرز موجب شکل‌گیری گسل‌های راندگی و فرورانش مجموعه‌های اقیانوسی تئیس کهن بر روی البرز شمالی شده ولی، نخستین کوهزایی آلپی واقعی در پالئوسن همزمان با رویداد لارامید، رخ داده که با گسلش راندگی، چین خوردگی و فراخاست، پیدایش حوضه‌های میان کوهی، انباشت آواری‌های همزمان با کوهزایی و مهاجرت پیش‌خشکی به سمت جنوب همراه بوده است. کوهزایی بعدی در آغاز الیگوسن بوده که ماگماتیسم درونی، از آب خارج شدن گسترده زمین و گسترش حوضه‌های میان کوهی از پیامدهای آن است. بازپسین فاز کوهزایی آلپی در اواخر پلیوسن یا اوایل پلیستوسن صورت گرفته که حاصل آن، گسلش، راندگی، مرتفع شدن و سیمای امروزی البرز است (آقانباتی، ۱۳۸۵). سیستم اصلی گسل‌های منطقه مورد مطالعه شامل راندگی‌ها (Thrust Faults)، گسل‌های امتداد لغز و معکوس است. اشتوکلین (۱۹۶۸)، بربریان (۱۹۸۳)، شنگور (۱۹۹۰) و ... به نقل از آقانباتی (۱۳۸۵) بیان کرده‌اند که در پهلو شمالی البرز راندگی‌ها به سمت جنوب شیب دارند و حرکت فرادیواره به سمت شمال است در حالی که در دامنه جنوبی، شیب راندگی‌ها به سمت

شمال و حرکت فرادیواره به سمت جنوب است. اما علوی (۱۹۹۱) این راندگی‌ها حاصل دو نسل راندگی می‌داند. نسل اول به سن ژوراسیک میانی و در ارتباط با حوادث زمین ساختی سیمیرین پیشین است ولی نسل دوم به سن سنوزویک و در ارتباط با کوهزایی آلپی است. راندگی‌های سیمیرین ویژگی شکل پذیر دارند ولی راندگی‌های آلپی ویژگی شکننده دارند (نقل از آقانباتی، ۱۳۸۵). در ذیل خلاصه ای از گسل های اصلی ذکر شده است.

– گسل دامغان

گسل دامغان از ۱۰ کیلومتری شمال شهر دامغان می‌گذرد و با برش نهشته‌های کواترنری، معرف یک گسل کواترنری می‌باشد. این گسل به گسل کواترنری شمال دامغان معروف است که با روند غرب جنوب غربی- شرق شمال شرقی به عنوان یک گسل کوهپایه‌ای در طی تاریخ تکتونیکی در چندین تکه مستقل از هم، سازوکارهای متفاوت و گاه متضادی از خود نشان داده است. به نحوی که در تکه‌ای راندگی، در تکه‌ای معکوس بزرگ زاویه و در تکه‌ای حتی عادی با مؤلفه امتدادی بوده است. ولی در تمام این حالات، با جنبش‌های خود موجب همبری واحدهای جوان تر سنوزویک با سنگ‌های قدیمی تر مزوزویک و پالئوزویک شده است. (خادمی، ۱۳۷۶ اقتباس از مقدسی، ۱۳۸۲). نخستین بار کرینسلی (۱۹۷۰)، ۱۴/۵ کیلومتر از طول گسل مذکور را مطالعه و آن را نوعی گسل کششی (نرمال) با شیب به سوی جنوب همراه با فرو افتادن بخش جنوبی دانست (آقانباتی، ۱۳۸۵). بنا به گزارش بریریان و همکاران (۱۳۷۵)، درازای این گسل حدود ۱۰۰ کیلومتر برآورد می‌شود و از دو بخش بنیادی خاوری و باختری ساخته شده است. بخش خاوری (از شمال دامغان تا ده‌ملا)، به طول ۵۳ کیلومتر، گاهی از میان کنگلومرای چین‌خورده نئوژن پسین و بادزن آبرفتی کهن و جوان کواترنر و گاهی در میان سیلت‌های رسی کواترنری است، و بلوک جنوبی آن پایین افتادگی دارد. در بخش باختری گسل دامغان (از شمال دامغان تا گردنه آهوان) بلوک شمالی فرو افتاده و بلوک جنوبی معرف

نوعی گسل فشاری با شیب به سوی جنوب است. هیچ‌گونه داده لرزه‌خیزی از گسل دامغان در دست نیست. امکان دارد زمین‌لرزه‌های ۲۲ دسامبر ۸۵۶ میلادی قوس و زمین‌لرزه ۹ ژانویه ۱۹۸۲، نتیجه جنبش گسل دامغان باشد (بربریان، ۱۳۶۳).

– گسل آستانه

در باختر روستای آستانه (واقع در شمال باختری شهر دامغان) و دره رودخانه آستانه، دو گسله موازی و کنار هم با راستای شمال خاوری- جنوب باختری دیده می‌شوند که در نزدیکی ۱۰ کیلومتری جنوب باختر آستانه، رسوبات آبرفتی کواترنر را به روشنی بریده و همراه با آبراهه‌های پهنه، به شکل چپ‌بر (left – lateral) جابجا نموده است (بربریان و همکاران، ۱۳۷۵). گسل آستانه یکی از گسل‌های نادر البرز کوه است که به سبب نزدیکی با مرز جنوبی البرز و وجود رسوبات آبرفتی کواترنر در کنار آن، به روشنی جنبش جوان کواترنر را نشان می‌دهد (بربریان و قریشی، ۱۳۷۶). درازای شناخته شده گسل آستانه بیش از ۷۵ کیلومتر بوده و ساز و کار آن راندگی با مولفه راستالغز چپ‌بر است (بربریان، ۱۳۶۳). اما بررسی‌های انجام شده بر روی ترانسه شماره ۴ مطالعات صورت گرفته توسط شکری و همکاران (۱۳۸۷) دلالت بر این داشته است که گسل آستانه به عنوان گسلی با سازو کار راستالغز چپ‌بر با مولفه عادی (نرمال) بوده است و آهنگ لغزش افقی آن $2/5$ میلی‌متر در سال برآورد شده است.

– گسل چشمه‌علی

گسلی با فاصله حدود ۲۰۰ متر بالا دست مظهر چشمه‌علی با روند شمال شرق- جنوب غرب (N50E, 73SE) با سازو کار معکوس در برونزدهای دلیچای مشخص است. طول این گسل در قسمت‌های شرقی حوضه به دلیل نهشته شدن آبرفت بر آن مشخص نیست. جابه‌جایی این گسل سبب ریزش بلوک‌های از آهک‌های دلیچای بر روی آبرفت‌های کنار جاده شده است (شکل ۱-۱۸، الف).

صفحه گسلی در شکل (۱-۱۸، ب) نشان داده شده است اما به دلیل انحلال آهک اثری از خش گسلی بر روی آن قابل مشاهده نیست.



ب) صفحه گسل چشمه علی، دید به سمت شمال



الف) گسل چشمه علی با سازوکار معکوس

شکل ۱-۱۸- گسل چشمه علی دامغان

لازم به توضیح است در فاصله حدود ۸۰۰ متر پایین دست مظهر چشمه علی در حاشیه جاده دامغان- چشمه علی گسل دیگری با موقعیت مکانی $36^{\circ}16'11.9''$ عرض شمال با امتداد N15E با زاویه ریک $R=65$ وجود دارد (شکل ۱-۱۹). روند این گسل به گونه ای می باشد که نسبت به گسل های چشمه علی و آستانه متقاطع می باشد و در نقشه زمین شناسی منطقه ثبت نشده است.



ب) زاویه ریک گسل موجود در پایین دست چشمه -

علی

الف) رخنمون گسل موجود در پایین دست

چشمه علی

شکل ۱-۱۹- رخنمونی از گسل موجود در فاصله ۸۰۰ متری پایین دست چشمه علی

۹-۱- هیدرولوژی منطقه

مهمترین رودخانه منطقه، رودخانه دائمی چشمه علی می باشد که از روستای آستانه شروع شده و با جهت جریان کلی شمال غرب - جنوب شرق، با طی مسیر ۳۰ کیلومتری در نهایت وارد دشت دامغان شده و اراضی شهر و روستاهای دشت دامغان را مشروب می کند. حوضه آبرگیر رودخانه چشمه علی مشتمل بر دو حوضه آبرگیر الف) دامغانرود ب) آستانه (سلطان میدان یا شورتنگه) می باشد. شاخه فرعی خروجی چشمه علی نیز با وارد شدن به رودخانه آستانه در تشکیل رودخانه چشمه علی مشارکت دارد. جهت اندازه گیری دبی و برآورد سالانه رودخانه چشمه علی ایستگاه هیدرومتری لبرود با مختصات $53^{\circ}13'$ طول شرقی و $36^{\circ}13'$ عرض شمالی در ارتفاع ۱۲۸۰ متری از سطح دریا در سال ۱۳۶۱ احداث شده است. با توجه به آمار حاصله حجم کل رواناب سالانه به طور متوسط ۲۷ میلیون متر مکعب محاسبه شده است و اندازه گیری های انجام شده هدایت هیدرولیکی، بیشترین مقدار را در بهمن ماه سال ۱۳۷۴ برابر با ۱۰۵۶ میکروموس بر سانتی متر و کمترین مقدار را در فروردین ماه سال ۱۳۷۷ برابر با ۸۶۵ میکروموس بر سانتی متر اندازه گیری شده است (وزارت نیرو، گزارش آمار برداری

رودخانه ها و انهار دامغان، ۱۳۷۸). رضایی توابع و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی هیدروبیولوژیک و یافته های زیستی رودخانه چشمه علی در سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷ بیان کرده اند که این رودخانه از نظر آلودگی در وضعیت آلودگی متوسط قرار دارد و از مظهر چشمه علی به طرف پایین دست رودخانه از آلودگی بسیار کم به آلودگی متوسط و آلودگی نسبتاً شدید گرایش پیدا می کند و در محل پل تفریک (۱۲ کیلومتری شمال شهر دامغان) در اثر خود پالایی رودخانه تا حدی از شدت آلودگی کاسته می شود. به دلیل تغییر دبی رودخانه در فصل بهار کمترین آلودگی و در پاییز آلوده ترین حالت را دارد. در ذیل خلاصه ای از ویژگی های حوضه های آبخیز دامغانرود و آستانه و شاخه فرعی چشمه علی توضیح داده می شود.

الف) دامغانرود و حوضه آبخیز آن

این رودخانه با مساحت حوضه آبخیز تقریبی ۶۵۰ کیلومتر مربع با حداکثر ارتفاع ۳۷۵۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۴۵۰ متر با روند شمال خاوری - جنوب باختری از کوه های شمال و شمال شرق دامغان سرچشمه می گیرد (وزارت نیرو، گزارش آمار برداری رودخانه ها و انهار دامغان، ۱۳۷۸). تمامی سرشاخه های فرعی و اصلی دامغانرود وارد دشت سیلابی کلاته می شود و سپس با جریان به سمت غرب و گذر از تنگه دامغانرود در جنوب شرقی روستای آستانه به آب رودخانه چشمه علی و آستانه ملحق می شود (شکل ۱-۹). بر اساس اندازه گیری های انجام شده در ایستگاه هیدرومتری دامغانرود حداکثر مقدار هدایت هیدرولیکی برابر با ۱۵۶۷ میکرو موس بر سانتی متر اندازه گیری شده است.

ب) حوضه آبخیز رودخانه آستانه (شورتنگه یا سلطان میدان)

این رودخانه با مساحت حوضه آبخیز حدود ۵۶۰ کیلومتر مربع و حداکثر ارتفاع ۳۲۵۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۴۷۰ متر با جهت کاملاً مخالف حوضه آبخیز دامغانرود از سمت غرب به شرق جریان دارد. جریان رودخانه آستانه از نوع فصلی است و آبدهی آن بسیار کم و تقریباً خشک می باشد (شکل ۱-۹).

۲۰). تنها در برخی از بخش‌های آن در سال، آب کمی جریان دارد (مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی دشت دامغان جلد دوم، ۱۳۸۸) طول آبراهه اصلی رودخانه آستانه بالغ بر ۳۵ کیلومتر می‌باشد (وزارت نیرو، گزارش رودخانه‌ها و انهار دامغان، ۱۳۷۸). سرشاخه‌های اصلی رودخانه آستانه از ارتفاعات شترگردان، کاشته کلا و کوه بفارد در شمال، غرب و جنوب روستای فولاد محله سرچشمه



شکل ۱-۲۰- نمای از بستر رودخانه آستانه (سلطان میدان- شورتنگه) در اردیبهشت ماه، دید به سمت شرق

می‌گیرند و با جهت عمومی جریان جنوب غربی- شمال شرقی به نام رود سلطان میدان شروع می‌شود و در ادامه با عبور از روستاهای اکره و سپس شورتنگه به نام رودخانه شورتنگه تغییر نام داده و جریان خود را با همان جهت عمومی قبلی ادامه می‌دهد. رودخانه شورتنگه پس از ورود به پشیمان دشت به رودخانه آستانه تغییر نام داده و تا رسیدن به رودخانه دامغانرود با همین نام و با جهت عمومی جنوب غربی- شمال شرقی جریان دارد (شکل ۱-۹). بر خلاف دامغانرود شیب توپوگرافی در مسیر این رودخانه بسیار کم و جریان آن بسیار آرام است و تنها یکی از شاخه‌های آن که از کوه‌های شاه دژ

سرچشمه می‌گیرد از مخروطه افکنه‌های با شیب تند عبور نموده و جریان بسیار تند دارد (مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیر زمینی دشت دامغان جلد دوم، ۱۳۸۸).

ج) شاخه فرعی مظهر چشمه علی

شاخه فرعی چشمه علی، جریان آب چشمه علی را به رودخانه آستانه هدایت می‌کند. طول این شاخه حدود ۴ کیلومتر می‌باشد و از ابتدای مظهر چشمه علی تا نقطه اتصال آن به رودخانه فصلی آستانه ادامه می‌یابد. رضایی توابع و همکاران (۱۳۸۹) آب چشمه علی را از نظر آلودگی بیولوژیکی برای مصرف شرب انسانی مناسب ذکر کرده‌اند.

با توجه به مطالب فوق و اندازه‌گیری‌های انجام شده رودخانه دامغانرود در ایستگاه هیدرومتری دامغانرود و رودخانه چشمه‌علی در ایستگاه لبرود در بهمن ماه سال ۱۳۷۴ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به طور کلی آب رودخانه آستانه از نظر کیفی بهتر از رودخانه دامغانرود می‌باشد اما نمی‌توان با قاطعیت گفت چون حوضه آبگیر دامغانرود حدود ۹۰ کیلومتر مربع بیشتر از حوضه آبگیر آستانه است. از سوی دیگر فصلی بودن رودخانه آستانه و تبخیر آب موجب نهشته شدن املاح در بستر رودخانه شده و به همین دلیل در اوائل شروع جریان دوباره میزان املاح اندازه‌گیری شده بیشتر می‌باشد.

۱-۱۰- هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

در حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان هیچگونه چاه بهره‌برداری یا اکتشافی حفر نشده اما در جنوب تاقدیس چشمه‌علی در داخل آبرفت‌های کواترنری تعداد ۲۴ حلقه چاه حفاری جهت مصارف کشاورزی حفر شده است (شکل ۱-۹). بنابر اطلاعات آمار برداری سال ۱۳۸۲ امور آب شهرستان دامغان مجموع برداشت سالانه آب از این چاه‌ها ۱/۴۶۳/۰۱۲ مترمکعب می‌باشد. این چاه‌ها عمیق بوده و عمقی مابین ۹۰ تا ۱۸۰ متر دارند و روند کلی افزایش عمق حفاری از شرق حوضه (از محل چشمه) به غرب

مشاهده می‌شود. نوع سفره در این چاه‌ها آزاد ذکر شده است. سنگ کف شیل شمشک و آهک‌های لار قید شده است. لازم به ذکر است هدایت الکتریکی نزدیک‌ترین چاه به چشمه (با فاصله ۷۰۰ متر در جنوب غربی چشمه) ۱۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و مابقی با روند کلی افزایش به سمت غرب حوضه از ۲۰۰۰ تا ۶۸۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده‌اند. از آنجا که رودخانه آستانه فصلی می‌باشد لذا بالا بودن هدایت الکتریکی این چاه‌ها دال بر تغذیه این چاه‌ها از این رودخانه می‌باشد. در فصول خشک ته‌نشست املاح در بستر رودخانه صورت می‌گیرد، جریان دوباره رودخانه و نفوذ آب سبب بالا بردن هدایت الکتریکی آب این چاه‌ها شده است.

فصل دوم

تاریخچه مطالعات انجام شده

۱-۲- مقدمه‌ای در مورد کارست

واژه کارست، ریشه از لغت کارا (karra/gara) در زبان اسلاو دارد که به معنی سنگ می باشد. اولین بار در نیمه دوم قرن نوزدهم میلادی جهت توصیف مناطقی از یوگسلاوی سابق (Dinaric Alps) به کار برده شده است (Ford and Williams, 2007). سازندهای کارستی حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد از سطح خشکی‌ها را می‌پوشاند (Bonacci, 1990; Bonacci, 1987) اما به گفته دیگر نواحی کارستی حدود ۱۲ درصد از سطح خشکی‌ها را تشکیل می‌دهد (Ford and Williams, 2007; Darnault, 2008). مصرف آب حدود ۲۵ درصد جمعیت جهان از منابع کارستی می‌باشد و در مناطق خاورمیانه و جنوب شرقی آسیا از منابع عمده تامین آب می‌باشند (Darnault, 2008) در ایران حدود ۱۱ درصد از کل کشور را سازند های کارستی می‌پوشاند که حدود ۵۲ درصد آن‌ها در رشته کوه‌های زاگرس قرار گرفته‌اند (Raeisi, 2002). با توجه به خلاصه آمار ذکر شده اهمیت منابع آب کارستی به عنوان یکی از با ارزش ترین منابع تامین آب در جهان و ایران بیش از پیش آشکار می‌شود.

فورد و ویلیام (Ford and Williams, 2007) در یک تعریف جامع، کارست را عبارت از نواحی و چشم اندازهای با عوارض سطحی مشخص و مورفولوژی خاص، با حداقل یک سیستم زهکشی قوی آب زیرزمینی که ناشی از انحلال سنگ‌های با قابلیت انحلال بالا از قبیل سنگ آهک، مارن (marble) و ژیپس (اما بیشتر سنگ آهک) در آب‌های طبیعی بیان نموده‌اند.

۲-۲- سفره‌های کارستی و عوامل موثر بر توسعه در آن

سنگ‌های کربناته‌ای که دارای آب زیرزمینی باشند و بتوان آب از آن‌ها بهره برداری کرد، می‌توان به عنوان سفره‌های کارستی در نظر گرفت (Bakalowicz, 2005 به نقل از Darnault, 2008). نواحی کارستی نتیجه کارستی شدن (Karstification) و توسعه آن می‌باشد. کارستی شدن پدیده انحلال سنگ‌ها در آب‌های جوی بوده که تحت فرآیند فیزیکوشیمیایی صورت می‌گیرد. لازمه کارستی شدن، تاثیر مجموعه‌ای از عوامل همانند اقلیم، آبشناسی، تکتونیک، چینه شناسی و سنگ شناسی در طول زمان و توسعه کارست می‌باشد. پیچیدگی و تعدد عوامل موثر بر کارستی شدن سبب شده است که در مناطق مختلف جغرافیایی، آب و هوایی و ... انواع مختلف کارست مشاهده شود. مهمترین عامل در کارستی شدن، آب و اثر انحلال آن در سازندهای قابل حل نظیر کربنات‌ها می‌باشد. توسعه کارست و سرعت واکنش شیمیایی انحلال وابسته به کیفیت و کمیت (مقدار و سرعت جریان) آب موجود می‌باشد. در جریان‌های با سرعت زیاد انحلال سنگ‌ها در مدت زمان کوتاه به خوبی صورت نمی‌گیرد ولی در جریان‌های آهسته واکنش فیزیکوشیمیایی انحلال در آب به خوبی صورت می‌گیرد و آب از نظر کلسیت اشباع می‌گردد (Darnault, 2008). ولی لیتولوژی مهمترین عامل در جهت گیری جریان آب زیرزمینی در کارست می‌باشد. سایر عوامل شرط لازم می‌باشند ولی کافی نیستند. در ذیل فرآیند انحلال در کارست و عوامل تاثیرگذار بر آن به طور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

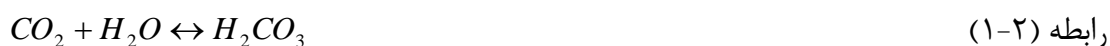
۲-۲-۱- انحلال در کارست و عوامل موثر بر توسعه آن

انحلال سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) علت اصلی پدیده کارستی شدن در سطح و زیر سطح زمین می‌باشد. سنگ آهک فراوانترین نوع سنگ‌های کربناته است که بخش اعظم آن را کربنات کلسیم تشکیل می‌دهد. خلوص سنگ آهک از فاکتورهای تاثیرگذار در توسعه کارست می‌باشد. هر چه درجه خلوص سنگ آهک بیشتر باشد پدیده کارستی شدن در آن گسترش بیشتری خواهد یافت

(کرمی ۱۳۷۲). مناطق کارستی با توسعه یافتگی بالا در سنگ‌های کربناته با خلوص بیشتر از ۷۰ درصد رخ می‌دهند (Ford and Williams, 2007). دولومیت خالص سرعت انحلال کمتری از کلسیت دارد. کانی‌های رسی، منیزیم و سیلیس از رایجترین و بیشترین ناخالصی‌های سنگ‌های کربناته است. مطالعات زیادی بر رابطه مثبت سرعت انحلال کربنات با درصد CaO نتیجه شده است اما مطالعات آزمایشگاهی راوچ و وایت (Rauch and White, 1970) در پنسلوانیا نشان داد که بیشترین سرعت انحلال کربنات هنگامی صورت می‌گیرد که مقدار ۱ تا ۳ درصد MgO در ترکیب آن موجود باشد، این مقدار اکسید منیزیم باعث تغییر وضعیت بلور کلسیت و به تبع افزایش سطح تماس و افزایش انحلال می‌شود. در سنگ‌های غیرکربناته نظیر ژئپس، انیدریت و نمک که می‌توانند کارست‌های کوچکی تشکیل دهند سرعت انحلال بسیار بیشتر و رابطه مستقیم و مثبت بین سرعت انحلال و خلوص سنگ وجود دارد (Ford and Williams, 2007).

به طور ساده پدیده انحلال در سیستم ساده‌ای که حاوی کربنات کلسیم (CaCO_3)، دی اکسید کربن (CO_2) و آب (H_2O) می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پدیده انحلال شامل فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی متعددی می‌باشد که در آن سه حالت به هم پیوسته گاز، مایع و جامد مشارکت دارند. این پدیده موجب انتقال جرم در سطح مشترک هوا و آب و هم چنین آب و سنگ می‌شود که فرآیندها در سطح مشترک‌های مذکور فیزیکی بوده و در داخل محلول به صورت شیمیایی می‌باشد. نحوه رخداد این فرآیندها به صورت زیر می‌باشد:

طبق رابطه (۱-۲) دی اکسیدکربن موجود در هوا در خلال بارندگی، در آب حل می‌شود و اسید کربنیک (H_2CO_3) تولید می‌کند.



بدیهی است غلظت اسید کربنیک تولید شده در واکنش بالا به فشار جزیبی دی اکسیدکربن موجود وابسته است. اسید کربنیک تولید شده طی واکنش اکسیداسیون به صورت رابطه (۲-۲) تجزیه می‌شود.



در مرحله دوم اکسیداسیون، اسید کربنیک به صورت زیر تجزیه می شود رابطه (۲-۳).



ثابت تعادل تجزیه اول اسید کربنیک بزرگتر از دوم می باشد چون گرفتن یون H^+ از یک یون با بار منفی (HCO_3^-) سخت تر است. با توجه به واکنش های بالا ملاحظه می شود که محلول حاضر دارای اجزای H_2CO_3 ، HCO_3^- ، CO_3^{2-} ، H^+ می باشد. کربنات کلسیم به صورت کلسیت یا آراگونیت در آب های بدون گاز کربنیک تقریباً غیرقابل حل است و تنها در شرایطی که آب واجد گاز کربنیک باشد، امکان انحلال آن وجود دارد. واکنش خلاصه شده انحلال در سنگ های کربناته به صورت زیر است.



رابطه (۴-۲) واکنش تعادلی است که پیشرفت آن به هر جهت به غلظت H_2CO_3 وابسته است. به طور کلی پیشرفت واکنش به غلظت CO_2 محلول در آب وابسته است. هر گاه غلظت CO_2 افزایش یابد واکنش از چپ به راست صورت گرفته و آهک حل می شود. به ندرت نیز اتفاق می افتد که CO_2 محلول در آب به دلیل کاهش فشار متصاعد گردد. این پدیده در آب هایی که از اعماق سنگ آهک به طرف سطح زمین جریان دارند، صورت می گیرد. در این حالت، کاهش فشار در محل خروج آب موجب متصاعد شدن CO_2 موجود در آب شده، و بی کربنات کلسیم محلول به صورت تراورتن در اطراف چشمه ها و یا به صورت رسوبات استالاکتیت (Stalactite) و استالاگمیت (Stalagmite) بر روی دیواره، سقف و کف غارها رسوب می کند. از جمله عوامل فیزیکی و شیمیایی تاثیرگذار بر انحلال سنگ های کربناته عبارتند از (اقتباس از مینویی، ۱۳۸۸):

✓ فشار دی اکسید کربن که افزایش آن موجب کاهش pH محیط گشته و در نتیجه میزان

انحلال سنگ کربناته افزایش می یابد.

- ✓ هدایت الکتریکی آب عبوری از سنگ کربناته، که با افزایش هدایت الکتریکی از مقدار انحلال کاسته می‌شود.
- ✓ حجم سیال موجود در محیط که با مقدار انحلال سنگ کربناته ارتباط مستقیم دارد.
- ✓ فشار موئینه که ارتباط مستقیم با مقدار انحلال دارد.
- ✓ دمای محیط، که هر چه دما پایین‌تر باشد بر مقدار فشار دی اکسیدکربن افزوده شده و در نتیجه موجب افزایش انحلال در سنگ کربناته می‌گردد.

۲-۳- انواع سفره‌های کارستی

سی‌وی‌جیک (Cvijic, 1924) اولین کسی بود که بر اساس ژئومورفولوژی، کارست‌ها را به سه گروه ناقص یا ضعیف (Merokarst)، حد واسط (Transitional) و بالغ (Holokarst) تقسیم کرده است (Karami, 2002). در قدیم کارست‌ها بر اساس محیط اقلیمی نیز رده‌بندی می‌شدند، کارست‌های که در مناطق گرمسیری و مرطوب تشکیل می‌شوند نسبت به کارست‌های مناطق سردتر و خشک‌تر درجه کارستی شدن بیشتری دارند (لشگری پور و همکاران، ۱۳۸۷). تقسیم بندی انواع سفره‌های کارستی می‌تواند بر اساس نوع تغذیه، نوع جریان، وضعیت شبکه مجاری جریان^۲، ذخیره و ظرفیت ذخیره، و پاسخ خروجی به تغذیه باشد (Ford and Williams, 2007). یک سفره کارستی را می‌توان یک سیستم باز با مرزهای محدود کننده حوضه‌ی با جریان‌های ورودی، درونی و خروجی همراه با مکانیسم‌ها و کنترل کننده‌هایی در نظر گرفت (Ford and Williams, 2007). تغذیه سفره‌های کارستی می‌تواند به صورت پراکنده^۳ یا متمرکز^۴ باشد. وقتی سفره کارستی در حوضه‌ای فقط با جریان ورودی بارش‌های مستقیم تغذیه گردد تغذیه اتوژنیک گفته می‌شود، اما اگر از جوانب سفره و یا سازندهای غیرکارستی فوقانی تغذیه به آبخوان نیز صورت گیرد تغذیه آلوتژنیک گفته می‌شود. تغذیه‌های اتوژنیک معمولاً تغذیه‌های پراکنده از برونزدهای سفره می‌باشد در حالی که تغذیه‌های

² conduit network topology

³ diffuse

⁴ concentrate

آلوزنیک غالباً تغذیه‌های متمرکز از نقاط ورودی می‌باشد. به طور مشابه نوع جریان نیز می‌تواند به صورت پراکنده (جریان افشان) و یا متمرکز (جریان مجرای) صورت گیرد (Burdon and Papakis, 1963 به نقل از Darnault, 2008).

با آنالیز هیدروگراف فروکش چشمه که پاسخی به تغذیه و نشان دهنده مجراها و ساختارهای زهکشی درونی سیستم کارستی می‌باشد، با کالویچ و منجین (Bakalowicz and Mangin, 1980) توسعه سفره‌های کارستی را در بازه مجاری با شبکه‌های خوب توسعه یافته تا سفره‌های بدون توسعه یافتگی تقسیم بندی کردند (نقل از مینویی، ۱۳۸۸). چشمه‌های کارستی نشانگر خاتمه سیستم رودخانه‌ی زیرزمینی و غالب شدن فرآیند جریان‌های سطحی می‌باشد. بر اساس خصوصیات هیدروژئولوژیکی، سنگ شناسی و ساختمانی کارست‌ها به دو نوع کارست پلاتفرمی و ژئوسنکلینالی تقسیم می‌شوند. در کارست پلاتفرمی طبقات آهکی تقریباً افقی یا کم شیب و دارای مقدار زیادی مارن و گاهی مارن به صورت لایه‌ای در بین طبقات نفوذپذیر دیده می‌شوند. این کارست کمتر تحت تاثیر پدیده تکتونیزم قرار گرفته و در نتیجه شبکه درز و شکاف و شکستگی کمتری در آن‌ها وجود دارد. کارست‌های ژئوسنکلینالی در نواحی چین خورده دیده می‌شوند که تحت تاثیر شکستگی‌ها و گسل‌های زیادی قرار دارند. در صورت فراهم بودن شرایط اقلیمی، ناودیس‌ها بهترین محیط برای توسعه کارست می‌باشند. مهمترین اختلاف بین کارست‌های پلاتفرمی و ژئوسنکلینالی پیچیدگی بیشتر شرایط هیدروژئولوژیکی و فعال‌تر بودن فرآیند کارستی شدن در کارست ژئوسنکلینالی می‌باشد (Milanovic, 1981؛ حسینی شفیعی، ۱۳۸۲). هراک (۱۹۹۷) دو نوع کارست را بر اساس منشا تکتونیک‌کی عنوان کرده است (نقل از دشتی برمکی، ۱۳۸۹).

الف) کارست خشکی زایی

این نوع کارست در سنگ‌های کربناته یا سایر سنگ‌های قابل انحلال تحت شرایط دریای اپی کانتیننتال توسعه می‌یابد. این نوع کارست در لایه‌های افقی یا نزدیک به حالت افقی ایجاد می‌شود. چین‌ها منظم هستند و گسل‌ها اغلب گسترش منطقه‌ای دارند. در این نوع کارست سیماهای

کارستی عمدتاً به صورت افقی توسعه می‌یابد. غارها و کانال‌های کارستی گاهی اوقات بزرگ و توسعه یافته هستند. شافت‌های عمودی خیلی کم در چشمه‌های با آبدهی متناوب و آبخوان‌های با ضریب ذخیره کم و تاخیری در این نوع کارست غالب است.

ب) کارست کوهزایی

این نوع کارست در سنگ‌های کربناته و سایر سنگ‌های قابل انحلال که در معرض حرکات تکتونیکی قوی (کوهزایی)، و در اغلب موارد رورانندی‌هایی به صورت اشکال ساختاری وسیع قرار گرفته‌اند، توسعه می‌یابد. ضخامت سنگ‌ها و محل آن‌ها در یک توالی ژئوسینکلاینی گونه‌های مختلف آن را تعیین می‌کند. علاوه بر روش‌های هیدروژئولوژی و ساختاری، از نظر مهندسی کارست‌ها بر اساس تنوع و فراوانی فروچاله‌ها به پنج نوع رده بندی می‌شود (جدول ۱-۲) (لشگری پور و همکاران، ۱۳۸۷؛ کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹).

جدول ۱-۲- رده بندی مهندسی انواع کارست (لشگری پور و همکاران، ۱۳۸۷؛ کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹).

رده کارست	درز و شکاف	فروچاله‌ها	محل تشکیل
تازه (KI)	حداقل، با شکستگی کم و نفوذپذیری ثانویه کم	کمیاب	فقط در بیابان‌ها و مناطق یخچالی با کربنات ناخالص
جوان (KII)	گسترده در چند متر در سطح و شکستگی کوچک با تعداد زیاد	تعداد کم فروچاله پر شونده یا فرونشستی کوچک	مناطق با حداقل دما
بالغ (KIII)	حفرات ثانویه گسترده با تعداد زیاد درز و شکاف	تعداد زیاد فروچاله پرشونده و فرونشستی و تعداد کم از نوع ریزشی و دفنی	مناطق معتدل و حاره‌ای با حداقل رطوبت
پیچیده (KIV)	حفرات انحلالی گسترده بزرگ بر روی شکستگی‌ها یا دور از آن‌ها	فروچاله انحلالی بزرگ زیاد، چند فروچاله فرونشستی، دفنی و ریزشی پراکنده	در مناطق معتدل و گرمسیری نرمال
منتهی درجه (KV)	حفرات انحلالی فراوان و بسیار پیچیده	همه انواع فروچاله با ابعاد بزرگ	فقط در مناطق گرمسیر مرطوب

همانگونه که از مطالب بالا مشاهده می‌کنید بیشتر تقسیم بندی مناطق کارستی بر اساس مشاهدات و قضاوت‌های شخصی صورت می‌گیرد. به همین دلیل روش‌های نوینی که بر اساس معیارهای، درجه و توسعه مناطق کارستی را به صورت کمی بیان کنند توسط محققین جدیدی با عنوان شاخص‌های کارستی شدن (Karstification indices) یا درجه کارستی شدن معرفی شده است. با کمک این روش‌ها می‌توان تفسیر مناسبی از توسعه مناطق کارستی داشته باشیم. در بخش‌های بعد توضیحات بیشتری را بخواهیم شاخص کارستی شدن ارائه می‌شود.

۲-۴- عوامل موثر در توسعه کارست

وایت (White, 1977) عوامل موثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست را به سه دسته عوامل فیزیکی، شیمیایی و هیدروژئولوژیکی تقسیم می‌نماید (نقل از دشتی برمکی، ۱۳۸۹)، که شامل موارد زیر است.

۱- بارندگی ۲- درجه حرارت ۳- فشار گاز کربنیک ۴- پستی و بلندی ۵- وضعیت چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی ۶- ضخامت لایه‌های کربناته ۷- موقعیت زمین ساختی (تکتونیکی)

در یک تقسیم بندی ساده عوامل موثر در توسعه کارست را می‌توان به دو دسته (۱) عوامل محیطی و بیرونی (۲) عوامل درونی تقسیم کرد. عوامل بیرونی شرایط محیطی تاثیرگذار بر آبخوان کارستی است که شامل بارش، دما، فشار گاز کربنیک، پوشش گیاهی، خاک و... می‌باشند. عوامل درونی مجموعه شرایط درونی آبخوان کارستی است که شامل زمین‌شناسی، لیتولوژی، مقدار درزه و شکستگی و... می‌باشد. با توجه به نقشی که هر یک از این متغیرها در کارست شدگی مناطق مختلف بازی می‌کنند، انواع مختلف کارست و درجه کارست شدگی متفاوتی ایجاد می‌شود. در زیر نحوه تاثیر این عوامل بر توسعه کارست توضیح داده می‌شود.

۲-۴-۱- آب و هوا و اقلیم

اولین و مهمترین فاکتور تاثیرگذار در توسعه کارست آب و هوا و اقلیم می‌باشد. این فاکتور به دو صورت در توسعه کارست دخیل است (۱) با تأثیر مستقیم در نوع بارش و مقدار آن، که بسته به شرایط آب و هوا و ارتفاع منطقه متفاوت است (۲) با تأثیر غیرمستقیم که بسته به دما و مقدار گاز کربنیک موجود در خاک، هوا و ریزش‌های جوی در پدیده کارستی شدن و انحلال سنگ آهک و در نهایت توسعه حجم فضاهای متخلخل تأثیر می‌گذارد. پارامترهای اقلیمی به طور عمده شامل بارش، دما و فشار گاز دی‌اکسیدکربن است. این سه پارامتر باهمدیگر در ارتباط می‌باشند. در زیر به طور خلاصه توضیح داده می‌شود.

۲-۴-۱-۱- بارش

میزان بارش و وجود آب فاکتور اصلی اقلیمی تاثیرگذار در توسعه کارست می‌باشد، به گونه‌ای که این عامل اصلی‌ترین متغییر در کنترل انحلال و فرسایش نواحی کارستی است. بدیهی است در شرایط یکسان هر چه مقدار و حجم نزولات در منطقه بیشتر باشد، مقدار نفوذ بیشتر و توسعه کارست نیز بیشتر می‌شود. بارش‌های ناگهانی و سیل‌آسا حجم زیادی رواناب تولید می‌کنند ولی بارش‌های تدریجی یا بارش برف و ذوب ملایم آن فرصت نفوذ بیشتری می‌دهند. فورد و ویلیامز (Ford and Williams, 2007) نقش نوع تغذیه را در توسعه کارست اینگونه بیان کرده‌اند، که تغذیه‌های نقطه‌ای و متمرکز (آلوژنیک) منجر به ایجاد مجاری کاندویت و رودخانه‌های زیرسطحی می‌شوند اما تغذیه پراکنده (اتوژنیک) تنها سبب افزایش خلل و فرج انحلالی (Pore) و شکاف شده و در کل تأثیر کمتری در توسعه کارست و مجاری کاندویت دارد.

۲-۴-۱-۲- دما

عامل دما بر انحلال و توسعه کارست به این صورت می‌باشد که اگر منظور از انحلال فقط انحلال CaCO_3 در آب باشد، مانند هر ماده قابل انحلال، با افزایش دما مقدار انحلال CaCO_3 در آب افزایش می‌یابد و اثر دما مثبت می‌باشد. ولی اگر منظور از انحلال تشکیل اسید کربنیک و انحلال CaCO_3 باشد، با افزایش دما ظرفیت انحلال CO_2 در آب کاهش یافته و در نتیجه خوردگی آب کاهش می‌یابد. به طور کلی در مناطقی که دما بسیار پایین باشد باعث ایجاد یخ زدگی و کاهش جریان آب، کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش احتمال کارستی شدن می‌شود. از سوی دیگر مناطق گرم و خشک به دلیل افزایش تبخیر مانع از توسعه کارستی می‌گردند. افزایش دما همچنین بر افزایش پوشش گیاهی منطقه تاثیر مثبت دارد اما این تاثیر مستقیم و خطی نیست، بلکه در حد خاصی از دما بیشترین پوشش گیاهی به وجود می‌آید.

۲-۴-۱-۳- فشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2)

افزایش فشار دی‌اکسید کربن موجود در هوا، باعث افزایش خاصیت اسیدی بارش‌های جوی و افزایش انحلال آهک و در نتیجه توسعه بیشتر کارستی می‌شود. افزایش باران‌های اسیدی با خاصیت خوردگی بیشتر نرخ انحلال سطحی درزه‌ها را افزایش می‌دهد. میزان گاز کربنیک موجود در خلل و فرج خاک به عوامل پیچیده دیگری چون پوشش گیاهی، مواد آلی خاک و وجود باکتری‌های هوازی تجزیه کننده در پیکره خاک بستگی دارد.

۲-۴-۲- زمین شناسی

عوامل زمین‌شناسی تعیین کننده نوع و گسترش سیستم کارستی می‌باشند به عبارت دیگر عوامل زمین شناسی تعیین کننده چهارچوب سیستم کارستی هستند که در آن عوامل متعددی عمل می‌کنند (White, 1988). در زیر این عوامل به طور جداگانه توضیح داده می‌شود.

۲-۴-۱- لیتولوژی

فورد و ویلیامز (Ford and Williams, 2007) بیان کرده‌اند، لیتولوژی و اشکال ساختاری (Structural feature) بیشترین تاثیر را در تشکیل کارست دارند. وجود سازندهای انحلال پذیر و انحلال در آن‌ها از شروط اصلی تشکیل و توسعه کارست است که وابسته به ترکیب سنگ می‌باشد. هر چه درجه خلوص سنگ در سازندهای کارستی بالاتر باشد، امکان پیشرفت پدیده کارست در آن بیشتر است. هر چه میزان ناخالصی سنگ کربناته بیشتر باشد، میزان انحلال کمتر و در نتیجه توسعه درزه و شکاف کمتر است. یکی از پارامترهای مهم در سازندهای کربناته نسبت میزان CaO به MgO در آن‌ها است. به این ترتیب که هرچه این نسبت بیشتر باشد قابلیت انحلال سنگ زیادتر می‌شود. به همین دلیل تحت شرایط یکسان در سنگ آهک نسبت به دولومیت، کارستی شدن توسعه بیشتری دارد.

۲-۲-۴-۲- جایگاه چینه شناسی

جایگاه چینه‌شناسی بیانگر ضخامت، و موقعیت سازند کربناته نسبت به لایه‌های زیرین و بالایی خود می‌باشد. ضخامت سنگ‌های کربناته، محدوده گسترش سیستم کارستی را بیان می‌کند. در صورتیکه سازندهای کربناته ضخامت و گسترش قابل توجهی داشته باشند، امکان تشکیل آبخوان کارستی بیشتر می‌شود. وجود لایه بندی شیب دار برای حرکت آب زیرزمینی و انحلال کربناتها لازم می‌باشد. لایه بندی‌های افقی نسبت به نفوذ و انحلال خنثی عمل می‌کنند. توالی چینه شناسی سازندها ممکن است به صورت‌های مختلفی در انحلال و توسعه کارست تاثیرگذار باشند. قرارگیری سازند نفوذ ناپذیر بر روی سازند انحلال پذیر، مانع از رسیدن آب به آن و در نتیجه کاهش انحلال و توسعه کمتر سازند می‌شود. وجود سازند انحلال ناپذیر اما خرد شده بر روی سازند انحلال پذیر منجر به ایجاد منطقه اشباع موقت و روند تدریجی نفوذ و توسعه پدیده‌های کارستی همانند چاهک‌ها می‌شود که در ادامه به ایجاد مجاری بزرگ کارستی منجر می‌شود. قرارگیری یک سازند زمین‌شناسی با قابلیت انحلال بالا بین دو سازند نفوذناپذیر، که در واقع سازند ساندویچی شده باشد سبب جریان ترجیحی آب در لایه با نفوذپذیری بالا و انحلال بیشتر و توسعه بیشتر آن می‌شود.

۲-۴-۳- عوامل تکتونیکی (درزه و شکاف، گسل، چین خوردگی)

تکتونیک موجود در منطقه با ایجاد گسل خوردگی، درزه و شکستگی، بالا آمدگی (Uplift)، شیب دار کردن لایه‌ها، چین خوردگی و افزایش تخلخل‌های ثانویه در توسعه کارست نقش مهمی ایفا می‌کند.

۲-۴-۳-۱- درزه و شکستگی‌ها

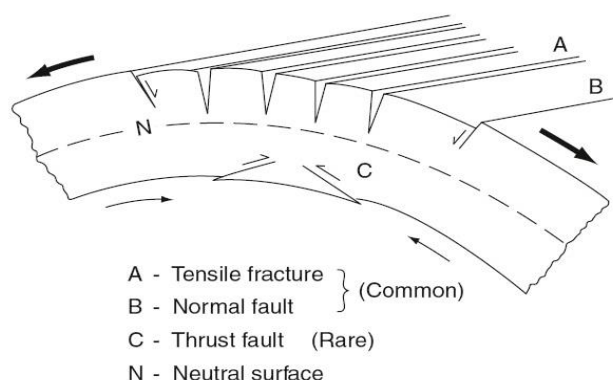
درزه‌ها ترک‌های صفحه‌ای هستند که دو طرف آن نسبت به هم حرکت و جابه‌جایی محسوسی نداشته باشند. درزه‌ها شکستگی‌های مهمی در کنترل سیستم‌های هیدروژئولوژیکی و فرآیند جریان آب‌های زیرزمینی هستند که با برهم زدن بافت اولیه و دست نخورده سنگ‌ها و ایجاد مناطق خرد شده موجب گسترش تخلخل ثانویه و افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها می‌شود. اغلب شکستگی‌ها در اثر نیروی‌های تکتونیکی ایجاد می‌شوند، ولی هوازدگی و تخریب مکانیکی نیز گاهی عامل ایجاد شکستگی هستند. به طور کلی درزه‌ها تا عمق قابل توجهی از پوسته نفوذ می‌کنند ولی فراوانی آن‌ها نسبت به عمق کاهش می‌یابد. درزه‌های منظم و تقریباً موازی را، درزه‌های سیستماتیک و درزه‌های انحنای دار و غیرموازی را درزه‌های غیرسیستماتیک نامیده می‌شوند.

۲-۴-۳-۲- گسل‌ها

گسل‌ها شکستگی‌های می‌باشند که صفحات آن نسبت به همدیگر جابه‌جایی قابل توجهی داشته باشند. گسل‌ها با ایجاد برش و جابه‌جایی در سنگ‌ها و افزایش شدت شکستگی‌ها در اطراف خود باعث افزایش نفوذپذیری می‌شوند. این شکستگی‌ها گاهی تا شعاع یک کیلومتر اطراف گسل گسترش می‌یابند. گاهی گسل‌ها با جابجایی واحدهای مختلف، سنگ‌های با درجه نفوذپذیری متفاوت را در کنار یکدیگر قرار می‌دهد که باعث تغییر جهت جریان آب زیرزمینی می‌شود.

۲-۴-۳-۳- چین خوردگی‌ها

همراه با چین خوردگی شکستگی در سنگ‌ها صورت می‌گیرد. تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها از مهمترین اشکال چین خوردگی هستند که همراه با نیروهای کششی و فشارشی ایجاد می‌شوند و در این شرایط الگوی درزه و شکستگی خاصی به وجود می‌آیند (Ford and Williams, 2007). در کمان بیرونی چین خوردگی، نیروهای کشش و در کمان درونی نیروهای فشارش غالب می‌باشد. که به این ترتیب در نواحی بیرونی شکستگی‌های کششی و گسل نرمال ایجاد می‌شود و در نواحی داخلی چین خوردگی ممکن است گسل تراستی تشکیل شود (شکل ۲-۱) (Singhal and Gupta, 2010). درجه کارستی شدن و هدایت هیدرولیکی غالبا" با افزایش عمق کاهش می‌یابد. اما برعکس در ناودیس‌ها با افزایش عمق درجه کارستی شدن افزایش و در تاقدیس‌ها کاهش می‌یابد (Goldscheider and Drew, 2007). به طور کلی تاقدیس‌ها پتانسیل بالای در تغذیه سفره‌های زیرزمینی دارند ولی ناودیس‌ها در همگرایی و تجمع جریان‌ها نقش دارند (Ford and Williams, 2007).



شکل ۲-۱- ایجاد شکستگی در لایه‌ها همراه با چین خوردگی (Singhal and Gupta, 2010)

کنترل شکل و جهت‌گیری سیماهای کارستی و شکستگی‌ها، توسط تکنیک کنترل می‌شوند. به عنوان مثال در منطقه کوه‌های کارستی شاهو تعداد زیادی فروچاله وجود دارد که در امتداد سطوح لایه بندی و امتداد گسل‌ها شکل گرفته‌اند (مینویی، ۱۳۸۸). چاله دامغان به شکل بیضی است که قطر

بزرگ آن در جهت شمال شرق - جنوب غرب به موازات محور اصلی البرز شرقی و روندهای تکتونیکی حاکم بر منطقه است (گزارش نیمه تفصیلی زمین شناسی دشت دامغان، ۱۳۸۸). همچنین جهت-گیری گالری‌های غارها اغلب از روند شکستگی اصلی منطقه تبعیت می‌کند (Shanovand Cousset, 1993) اقتباس از مینویی، ۱۳۸۸) همچنین پاول (Pawl, 1977) نشان داده است که اصولاً همه کانال-های انحلالی مستقیم، سینوسی و معابر غارها در ایالت ایندیانا ای آمریکا در طول درزه و شکافها توسعه یافته اند (اقتباس از دشتی برمکی، ۱۳۸۹)

۲-۴-۴- پوشش گیاهی

گیاهان چندین تاثیر مثبت و یک تاثیر منفی در توسعه کارست دارند. فشار ریشه گیاهان سبب تخریب و شکستگی سنگها و ایجاد فضای نفوذپذیر در کنار آنها می‌شود. وجود برگ گیاهان میزان هوموس خاک را افزایش می‌دهد. افزایش CO₂ حاصل از تنفس ریشه‌ها باعث افزایش اسیدیته و افزایش انحلال سنگهای کربناته می‌شود. ممانعت از فشرده شدن خاک و ایجاد روانابهای سطحی، و در نتیجه افزایش نفوذ این جریانات و همچنین ایجاد سایه و جلوگیری از تابش مستقیم خورشید بر خاک و کم شدن تبخیر، از تاثیرات مثبت پوشش‌های گیاهی در توسعه کارست می‌باشد. اما از سوی دیگر پوشش‌های گیاهی متراکم و انبوه به ویژه درختی، از رسیدن آب‌های جوی به سطح زمین ممانعت می‌کند و این آب‌ها مستقیماً از سطح برگ‌ها و شاخه درختان تبخیر و مجدداً به جو بر می‌گردد.

۲-۴-۵- پوشش خاک

در مناطق کارستی که سطح آهک توسط خاک پوشیده شده باشد نرخ نفوذ آب به درون آهک توسط این خاک کنترل می‌شود در غیر این صورت قابلیت انتقال آهک در جهت عمودی نرخ نفوذ را کنترل می‌کند (Williams, 1983). خاک‌های پوشاننده سنگ‌های آهک می‌توانند منبع ذخیره آب‌های جوی باشند. بافت، جنس و ضخامت خاک در نفوذ آب موثر هستند. چگونگی خاک از نظر نسبت ذرات تشکیل دهنده را بافت خاک گویند. خاک دانه درشت نسبت به خاک دانه ریز در نفوذ آب مؤثرتر است

اما آب کمتری را در خود می‌تواند ذخیره کند. چنانچه ذرات خاک دانه ریز بوده و ضخامت آن قابل توجه باشد میزان آب نفوذی کاسته می‌گردد. علاوه بر آن خاک‌های رسی با پر کردن درز و شکاف‌ها سبب کاهش نفوذپذیری و انتقال آب به اعماق می‌شوند. ترکیب شیمیایی آب نفوذی وابسته به ترکیب شیمیایی خاک، مدت زمان تماس و ... می‌باشد. همچنین خاک‌ها در فراهم کردن محیطی جهت رویش گیاهان نیز حائز اهمیت است. با توجه به اینکه بیشتر حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان فاقد پوشش خاک می‌باشد در این تحقیق از این عامل در توسعه کارست استفاده نشده است.

۲-۴-۶- شیب

شیب توپوگرافی از عوامل ژئومورفولوژیک موثر در توسعه کارست است. توپوگرافی سطح زمین با ایجاد تغییرات در میزان دما، بارش، نوع پوشش گیاهی و تبخیر نسبت به ارتفاع و ایجاد شیب‌های مختلف بر میزان نفوذ و رواناب تولید شده و در نهایت توسعه کارست موثر می‌باشد. در شیب‌های زیاد فرصت باقی ماندن آب بر روی زمین برای نفوذ وجود ندارد ولی در شیب‌های کم فرصت باقی ماندن و سپس نفوذ آب‌های سطحی بیشتر و به تبع توسعه کارست بیشتر می‌باشد. در شیب‌های زیاد امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد و رویش گیاه فراهم نمی‌باشد. هر چه منطقه‌ای مرتفع‌تر و شیب کمتر باشد، مقدار بارش‌ها بیشتر و دما پایین‌تر بوده که به تبع میزان تبخیر و هدر روی آب‌ها کمتر و احتمال توسعه کارست بیشتر می‌باشد. لذا شیب توپوگرافی از عوامل موثر در توسعه کارست می‌باشد.

۲-۴-۷- آبراهه‌ها

آبراهه‌ها در سطح زمین به عنوان معبر عبور آب از ارتفاعات به پایین دست به شمار می‌روند و می‌توانند در نفوذ آب به درون زمین مؤثر باشند، به خصوص اگر در مناطق کم شیب و در محل عبور گسل‌ها یا درزه‌های بزرگ تشکیل شده باشند، چرا که آب هنگام عبور از آن‌ها برای مدتی فرصت نفوذ به درون زمین را پیدا می‌کنند. این وضعیت در آبراهه‌های رده بالاتر که حجم بیشتری از آب را در مدت زمان طولانی‌تر دریافت می‌کنند نمایان‌تر و پر اهمیت‌تر می‌باشد (حسینی شفیع‌ی، ۱۳۸۲). اما

واضح است که شبکه‌های زهکشی متراکم، بیانگر تغذیه کمتر زمین شناسی منطقه است (Shaban *et al.*, 2006).

۲-۵- مروری بر مطالعات انجام شده با استفاده از سنجش از دور و GIS

مطالعات صحرایی از دقیق‌ترین روش‌ها در شناسایی ژئومورفولوژی و هیدرولوژی مناطق کارستی است، اما نبود میدان دید وسیع و پراکندگی مکانی این پدیده‌ها، اندازه‌گیری صحرایی آنها را بسیار زمان بر و دشوار می‌سازد. تکنیک‌های سنجش از دور (RS) و پردازش اطلاعات در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS⁵) به کارشناسان این توانایی را می‌دهد که با مطالعه مناطق با وسعت زیاد، حجم عظیمی از اطلاعات را در سریع‌ترین زمان پردازش کنند. کاربرد GIS در زمین شناسی جهت تجزیه و تحلیل الگوهای فضایی موجود در نقشه‌ها و تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی به منظور ارائه مدلی از واقعیات موجود در منطقه بسیار سودمند می‌باشد. استفاده از سنجش از دور جهت پی بردن به خصوصیات هیدروژئولوژیک و دستیابی به آب‌های زیرزمینی توسط محققین زیادی در مناطق مختلفی انجام شده است که سودمندی این ابزار را در شرایط مختلف زمین شناسی تایید می‌کنند.

سنر و همکاران (Sener *et al.* 2005) جهت اکتشاف منابع آب زیرزمینی و پتانسیل یابی منطقه Burder) در ترکیه جهت اکتشاف منابع جدید و حفاری چاه‌های استخراجی از سنجش از دور و GIS استفاده کرده‌اند. در این تحقیق از عکس‌های ماهواره لندست (Landsat TM) استفاده شده است. عوامل لیتولوژی، بارش سالانه، تراکم خطواره‌ها، نقشه کاربری عوارض، توپوگرافی، شیب و همچنین تراکم آبراهه‌ها تهیه شده و با وزن‌های خاصی در محیط GIS تلفیق شدند. نتایج این تحقیق نشانگر مفید بودن این تکنیک‌ها در پیش بینی نواحی با پتانسیل بالاتر آب زیرزمینی است. شعبان و همکاران (Shaban *et al.* 2006) جهت تشخیص مناطق با پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در منطقه کارستی با مساحت حدود ۵۰۰۰ km² در لبنان از مطالعات سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره

⁵ Remote sensing

⁹ Geographic information system

برده‌اند. عوامل موثر در پتانسیل یابی نفوذ در این تحقیق شامل: لیتولوژی، خطواره‌ها، آبراهه‌ها، محدوده‌های کارستی^۷، پوشش گیاهی و کاربری اراضی می‌باشند. جهت استخراج و تعیین این فاکتورها از تصاویر ماهواره‌ای (لندست ETM7 و SPOT)، عکس‌های هوایی و داده‌های دیگر نظیر نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ و زمین شناسی استفاده شده است. به هر لایه وزن خاصی داده شده و در محیط GIS تلفیق شدند. نقشه نهایی منطقه مورد مطالعه را به پنج بخش اصلی با پتانسیل تغذیه متفاوت توصیف می‌کرد. حدود ۵۷ درصد منطقه دارای تغذیه زیاد بوده که منطبق با مناطق مرتفع با توسعه کارست بیشتر می‌باشد. سلومون و کوئل (Solomon and Quiel, 2006) با استفاده از سنجش از دور، GIS و مطالعات صحرایی، تحقیقی در زمینه منابع آب زیرزمینی اریتره (Eritrea) انجام داده‌اند. در این مطالعه با اعمال فیلترهای جهت مناسب بر عکس‌های ماهواره‌ای لندست و همچنین استفاده از داده‌های DEM، نقشه ژئومورفولوژی و خطواره‌ها تهیه شدند. نقشه‌های عامل در این مطالعه لیتولوژی، خطواره‌ها، ژئومورفولوژی و شیب می‌باشند. این لایه‌ها در GIS ادغام شده و نتیجه حاکی از اثر لیتولوژی و ساختارها در کنترل آب‌های زیرزمینی و ارتباط خطواره‌های بزرگ با آبدی بالای چاه‌ها و چشمه‌ها می‌باشد. استفاده از سنجش از دور و GIS به عنوان ابزارهای توانمند در مطالعه منابع آب زیرزمینی و طراحی نقشه‌های اکتشافی در این تحقیق پیشنهاد شده است.

یه و همکاران (Yeh, et al. 2009) جهت جستجوی مناطق پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در حوضه چی-پن کریک (Chih-Pen Creek) در شرق تایوان از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS بهره برده‌اند. نقشه‌های عامل در این مطالعه لیتولوژی، خطواره‌ها، آبراهه‌ها، شیب و کاربری زمین (پوشش عوارض)^۸ می‌باشد. این عامل‌ها در GIS وزن دهی و با همدیگر تلفیق شدند. نقشه نهایی نشان دهنده این واقعیت بود که بیشترین مناطق پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی مربوط به تغذیه از ماسه سنگ‌های گراولی و نواحی کشاورزی با ارتفاع کم می‌باشد و کمترین پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی، مربوط به ارتفاعات زیاد با نفوذپذیری پایین سنگ آهک‌ها است. پاتاک و همکاران (Pathak et al. 2009) با

⁷ Karstic domains

⁸ Land use/Land cover

استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS به بررسی آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی سفره‌های کم عمق دره کاتماندو (Kathmandu) در نپال به روش DRASTIC پرداخته‌اند. مهمترین منبع تامین آب شرب اهالی این منطقه آب‌های زیرزمینی است که در اثر برداشت‌های بیش از حد و کاهش سطح آب زیرزمینی و نفوذ از رودخانه‌های سطحی آلوده، در معرض آلودگی قرار داشت. از آنجا که روش‌های مهندسی و تامین آب از منابع جدید هزینه بر می‌باشد لذا تکنیک‌های سنجش از دور و GIS جهت مدیریت و کنترل آبخوان در معرض آلودگی سودمند واقع شده است. لایه‌های مورد استفاده در این مطالعه عمق تا سطح آب زیرزمینی، تغذیه، جنس سفره^۹، پوشش خاک، توپوگرافی، تاثیر منطقه غیر اشباع^{۱۰} و هدایت هیدرولیکی می‌باشد. نتایج این مطالعه در مدیریت و کنترل آبخوان مفید واقع شده است. سنر و همکاران (Sener *et al.* 2009) نیز به آسیب پذیری حوضه (Senirkent-Uluborlu) در حوضه دریاچه (Egirdir) در ترکیه با استفاده از روش‌های سنجش از دور و GIS به روش مدل سازی DRASTIC پرداخته‌اند. هفت پارامتر مورد استفاده در این مطالعه شامل عمق تا سطح آب زیرزمینی، تغذیه، جنس سفره، پوشش خاک، توپوگرافی و تاثیر منطقه غیراشباع می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان دهنده این واقعیت بود که ۲۰/۸ درصد از حوضه نسبت به آلودگی آسیب‌پذیر بوده و استفاده از روش‌های سنجش از دور و GIS را در مدیریت آبخوان‌ها مفید ارزیابی کرده‌اند. کومار و همکاران (Kumar *et al.* 2010) با استفاده از سنجش از دور و GIS و همچنین به کمک نقشه‌های زمین‌شناسی به پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی حوضه (Kurmapalli Vagu) در هند پرداخته‌اند. لایه‌های مورد استفاده در این مطالعه زمین‌شناسی، آبراهه‌ها، ژئومورفولوژی، شیب، تراکم آبراهه‌ها و نقشه کاربری و پوششی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نقشه نهایی پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی این منطقه در پنج رده از خیلی خوب تا خیلی ضعیف ارائه شده است. نتیجه این تحقیق نشان دهنده کاربردی بودن و مفید بودن تکنیک‌های سنجش از دور و GIS در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی می‌باشد.

⁹ Aquifer media

¹⁰ Impact on vadose zone

خدایی (۱۳۷۹) در پایان نامه‌ای تحت عنوان "نقش نمایانگرهای آب‌های زیرزمینی در شناسایی منابع آب کارستی حوضه نمونه ارومیه با استفاده از GIS"، با استخراج عوارض سطحی از قبیل خطواره‌ها، نوع سنگ، پوشش گیاهی و الگوی آبراهه‌ها که به عنوان نمایانگرهای سطحی آب زیرزمینی معرفی شده است، به پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در این ناحیه پرداخته است. وی اظهار می‌دارد موقعیت ظهور چشمه‌ها انطباق خوبی با مناطق تعیین شده اکتشاف آب زیرزمینی دارد. عبادیان (۱۳۸۱) عوامل موثر در پتانسیل آب‌های کارستی کوه‌های گر و برم فیروز در استان فارس را با استفاده از روش‌های سنجش از دور و GIS ارزیابی کرده است. لایه‌های اطلاعاتی این مطالعه شامل زمین شناسی، فاصله از خطواره‌ها، فاصله از چاهک‌ها، فاصله از آبراهه‌ها، شیب، پوشش گیاهی، پوشش خاک، پوشش برف و باران می‌باشد. که با وزن‌های نسبی در محیط GIS ترکیب و مدل نفوذپذیری منطقه تهیه شده است. حسینی شفیعی (۱۳۸۲) به منظور بررسی عوامل موثر در نفوذپذیری تاقدیس کارستی پودنو در استان فارس از داده‌های دورسنجی و GIS استفاده کرده است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های رقومی ماهواره لندست (Landsat 5) لایه‌های زمین شناسی، خطواره‌ها و نوع پوشش گیاهی تهیه گردید. سایر لایه‌ها شامل بارندگی، تبخیر، نقشه همشیب و آبراهه‌ها با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های باران-سنجی و نقشه‌های توپوگرافی تهیه شد. بانک اطلاعاتی این مطالعه را لایه‌های زمین شناسی، فاصله از خطواره‌ها، بارندگی، تغییرات شیب، پوشش گیاهی، پوشش خاک، پوشش سنگ، فاصله از آبراهه‌ها و تبخیر می‌سازند. هر کدام از این لایه‌های اطلاعاتی مورد طبقه بندی کارشناسی قرار گرفتند و بر اساس درجه تاثیر عملکرد، در انتقال آب از سطح به زیرزمین امتیازبندی گردید. سپس لایه‌های اطلاعاتی به روش هم پوشانی شاخص‌ها، وزن دهی شده و با هم‌دیگر تلفیق شدند و در نهایت مدل نفوذپذیری نسبی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. اشجار (۱۳۸۳) جهت تعیین مناطق مستعد تغذیه در تاقدیس‌های سبزپوشان، قره، کفترک، قصرقمشه - پوک در حوضه شیراز- سروستان از داده‌های ماهواره لندست (Landsat TM) و GIS استفاده کرده است. جهت تهیه مدل نفوذپذیری نسبی لایه-های زمین شناسی، خطواره‌ها و نقشه خاک با پردازش تصاویر ماهواره لندست (Landsat TM) تهیه

شد. سایر لایه‌های اطلاعاتی شامل فاصله از آبراهه‌ها، پوشش گیاهی، تبخیر و شیب با استفاده از نقشه و اطلاعات موجود تهیه گردید. متناسب با اهمیت هر عامل در نفوذپذیری، به لایه‌های تهیه شده وزنی داده شد و در نهایت با روش همپوشانی شاخص‌ها (Index overlay) تلفیق شدند و مدل نفوذپذیری نسبی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید.

ملکی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از سنجش از دور و GIS به پهنه بندی توسعه و تحول کارست در استان کرمانشاه پرداخته‌اند. به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق ابتدا چاله‌های بسته سطحی به عنوان شاخص تحول کارست با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای ۵ متر IRS شناسایی و نقشه آن‌ها تهیه و پس از بررسی‌های آماری و تایید ارتباط نقشه‌ها با موضوع، هفت عامل ارتفاع، لیتولوژی، ژئومورفولوژی (زمین ساخت)، دما، بارش، تبخیر و شیب تهیه و با روش‌های آماری تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط GIS وزن دهی و هم پوشانی شدند. نتیجه این تحقیق انطباق بیشتر روش ارزش اطلاعاتی با شاخص انتخاب شده (چاله‌های بسته) در منطقه مورد مطالعه است. کلانتری و همکاران (۱۳۸۸) جهت بررسی عوامل موثر در ظهور چشمه‌های آبریز دشت ایزه در شرق استان خوزستان از فنون سنجش از دور و GIS استفاده کرده‌اند. نتایج بدست آمده از این تحقیق بیانگر ارتباط نزدیک بین رخنمون چشمه‌ها و فاصله از شکستگی‌ها می‌باشد. دشتی برمکی (۱۳۸۹) به پتانسیل‌یابی منابع آب کارست با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS در تاقدیس‌های دشتک و شاه نشین در جنوب غرب استان فارس پرداخته است. نتایج نشان داده است که بالاترین پتانسیل در نواحی اطراف تنگ چوگان در تاقدیس دشتک، و نواحی منتهی به دشت ارژن و بخش شمال غربی تاقدیس شاه‌نشین واقع می‌گردد. و نتایج آماری نشان داده است که در این منطقه موقعیت قرارگیری چشمه‌ها از موقعیت ساختارها پیروی نمی‌کند و بیشتر چشمه‌ها از نوع تماسی بوده و از مرز سازندهای نفوذناپذیر خارج می‌گردند. مرادی و همکاران (۱۳۸۹) در بخشی از پهنه کارستی زاگرس در محدوده شیراز تا یاسوج به بررسی تاثیر عوامل مختلف در توسعه کارست با استفاده از سنجش از دور و GIS پرداخته است. در این تحقیق لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، تراکم خطواره‌ها،

شیب سطح زمین، بارش، دما و پوشش گیاهی تهیه و با اعمال قضاوت کارشناسی و بازدید صحرایی طبقه بندی و فرآیند سلسله مراتبی (AHP) وزن دار شده و با روش هم پوشانی شاخص ها در محیط GIS تلفیق شدند. نتایج این تحقیق همخوانی مطلوبی بین حوضه آبرگیر چشمه های بزرگ و مناطق با توسعه کارست بالا نشان می دهد. کاظمی و همکاران (Kazemi et al. 2009) با استفاده از سنجش از دور و GIS به بررسی نقش عوامل ساختاری در فراوانی منابع آب در منطقه کارستی سد لار پرداخته اند. نتایج این تحقیق حاکی از ارتباط نزدیک بین خطواره ها، عناصر تکتونیکی، شبکه هیدروگرافی و شیب توپوگرافی با فراوانی منابع آب کارستی در این منطقه می باشد. خدری (۱۳۹۰) جهت بررسی توسعه کارست در تاقدیس پیون در استان خوزستان از تکنیک های سنجش از دور و GIS بهره برده است. در این مطالعه با پردازش تصاویر ماهواره ای لندست (Landsat ETM+) سال ۲۰۰۲ نقشه خطواره ها و پوشش گیاهی تهیه شد. با استفاده از نقشه خطواره ها، نقشه فاصله از خطواره ها و نقشه چگالی خطواره ها تهیه گردید. نقشه های لازم دیگر شامل نقشه دما، باران و شیب با استفاده از آمار و اطلاعات بارندگی و دمای منطقه مورد مطالعه و نقشه های توپوگرافی تهیه شد. لایه های زمین شناسی و گسل های منطقه نیز با استفاده از نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه تهیه شد. در نهایت بانک اطلاعاتی این مطالعه را لایه های زمین شناسی، چگالی خطواره ها، فاصله از خطواره ها، چگالی گسل ها، فاصله از گسل ها، پوشش گیاهی، تغییرات شیب، باران و دما می سازند. به این لایه ها متناسب با تاثیر عملکرد خود در توسعه کارست امتیازی داده شد و سپس به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و همپوشانی شاخص ها لایه ها وزن دهی و با همدیگر تلفیق شدند. صحت مدل ارائه شده با آبدهی چشمه های موجود سنجیده شده و نشان از آبدهی چشمه های نزدیک به مناطق با توسعه بیشتر در این مطالعه می باشد. با توجه به مطالعات انجام شده مذکور در بالا به خوبی سودمندی و توانایی تکنیک های سنجش از دور و GIS به عنوان ابزارهای توانمند در علم هیدروژئولوژی جهت پیش بینی و مدل سازی پدیده های در وسعت های زیاد و ناحیه ای را نشان می دهد. در مطالعه حاضر عوامل زمین شناسی، خطواره ها (فاصله از خطواره ها و تراکم خطواره ها)، گسل ها (فاصله از گسل ها و

تراکم گسل‌ها)، بارندگی، دما، شیب، پوشش گیاهی و فاصله از آبراهه‌ها مهمترین عوامل جهت بررسی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان تشخیص داده شد.

۲-۶- استخراج خطوطاره‌ها به روش سنجش از دور

خطواره (Lineament) ترکیبی از دو کلمه Line به معنی خط و mentum به معنی شبیه به خط یا خطوطاره می‌باشد. هوبس (Hobs, 1904) واژه خطوطاره را برای اولین بار برای مشخص کردن ارتباط مکانی عوارض سطح زمین بیان کرده است. این عوارض شامل، خط الراس‌ها یا مرزهای نواحی مرتفع، خطوط زهکشی، خطوط ساحلی، خطوط مرزی سازندها یا خطوط رخنمون‌ها می‌باشد. این محقق بعداً دره‌های تنگ و خطوط واضح شکستگی یا زون‌های برشی گسل‌ها را نیز به موارد فوق اضافه کرد (مینویی، ۱۳۸۸). اولیری و همکاران (O'Leary et al. 1976) خطوطاره‌ها را به عنوان اشکال خطی یا با انحنای کم سطح زمین معرفی کرده‌اند که احتمالاً منعکس کننده پدیده‌های زیرسطحی زمین می‌باشند (اقتباس از، shaban et al. 2006 و Qari, 2009). استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی (Resolution) متفاوت توسط محققین مختلف به منظور استخراج خطوطاره‌ها استفاده شده است. استخراج خطوطاره‌ها به دو روش اتوماتیک (با استفاده از نرم افزار ERDAS) و روش غیراتوماتیک (مشاهده‌ای یا انسانی) صورت می‌گیرد. شعبان و همکاران به دو روش اتوماتیک و غیراتوماتیک با استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای لندست (Landsat 7 ETM+) خطوطاره‌های منطقه‌ای در لبنان را استخراج کردند. آن‌ها در نهایت روش مشاهده‌ای را جهت ارائه خطوطاره‌های منطقه مورد مطالعه خود برگزیدند. قاری (Qari, 2009) تحقیقی در خصوص استخراج خطوطاره‌ها از عکس‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی (Resolution) متفاوت در منطقه (Wadi Bani Malik) شرق شهر جده در عربستان سعودی انجام داده است. در این مطالعه از شش نوع عکس ماهواره‌ای متفاوت، شامل قدرت تفکیک مکانی پایین از جمله لندست (Landsat MSS) با دقت ۸۰ متر، لندست (Landsat

(TM) با دقت ۳۰ متر و ۲۵ متر، عکس‌های ماهواره‌ای با دقت متوسط شامل پانکروماتیک^{۱۱} لندست (Landsat ETM⁺) با دقت ۱۵ متر، پانکروماتیک اسپات (SPOT) با دقت ۱۰ متر و عکس‌های ماهواره با قدرت تفکیک مکانی بالا شامل عکس پانکروماتیک ماهواره سنجش از دور هندی (IRS) با دقت ۵ متر استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان دهنده بیشترین فراوانی خطواره‌های استخراجی از عکس با دقت بالا می‌باشد. تعداد خطواره‌های استخراجی از عکس‌های ماهواره‌ای با دقت متوسط و پایین به ترتیب (N=۱۶۴۳) و (N=۸۹) بوده است. نتایج این تحقیق استفاده از عکس‌های با دقت بالا و متوسط جهت استخراج خطواره‌ها پیشنهاد می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام شده در این خصوص استخراج خطواره‌ها به روش اتوماتیک با سرعت و سهولت بیشتر اما ظاهراً همراه با خطاهای نیز می‌باشد لذا در مطالعه حاضر جهت استخراج خطواره‌های حوضه آبخیز چشمه‌علی دامغان از روش غیراتوماتیک و عکس با رزولیشن بالا (پانکروماتیک IRS با دقت ۵ متر) استفاده شده است.

۷-۲- جریان آب زیرزمینی در کارست

مهمترین خصوصیات هیدروژئولوژیکی سفره‌های کارستی ناهمگنی و نوع سیستم جریان آن‌ها می‌باشد. این خصوصیات به صورت قابل توجهی از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. در بعضی از موارد درجه ناهمگنی بسیار شدید می‌باشد و آب زیرزمینی از درون مجاری لوله مانند با قطر زیاد (بزرگتر از یک سانتی‌متر) حرکت می‌کنند و نوع جریان از حالت خطی خارج می‌شود، در چنین شرایطی آنالیزهای مرسوم (که بر حسب قانون دارسی استوار است) کاربرد ندارند. در موارد دیگر، درجه ناهمگنی خیلی بالا نیست و آب زیرزمینی معمولاً از داخل خلل و فرج‌های به هم پیوسته، درزه‌ها و شکستگی‌ها با بازشدگی کم عبور می‌کند. در چنین شرایطی سفره‌های کارستی کم و بیش

^{۱۱} Panchromatic

شبيه به سفره‌های دانه‌ای می‌باشند و در چنین سفره‌هایی می‌توان روش‌های مرسوم (که اساس آن‌ها معادله دارسی است) را به کار گرفت.

در یک سیستم کارستی دو نوع جریان وجود دارد. جریان افشان از طریق درز و شکاف‌های ریز و معمولاً به صورت جریان آرام (Laminar flow) صورت می‌گیرد و جریان مجرای که جریان سریع و آشفته است و در میان شکستگی‌ها و حفرات درشت کارستی صورت می‌گیرد (Bonacci, 1993; Atkinson, 1977). قابلیت انتقال مجاری کارستی بالا، ولی قابلیت ذخیره سازی آن‌ها پایین می‌باشد. برعکس قابلیت انتقال تخلخل ماتریکس (زمینه) کم ولی قابلیت ذخیره سازی بالای دارند (Milanovic, 1981 و Karami, 2002). محققین دیگری همچون (Whorthington *et al*, 2000; White, 1998) جریان آب در سیستم کارستی را با مدل نفوذپذیری سه گانه توضیح داده اند. سه جزء نفوذپذیری ماتریکس، نفوذپذیری شکستگی‌ها و نفوذپذیری مجاری بزرگ از اجزاء مستقل نفوذپذیری در یک سیستم کارستی هستند اما جریان آب زیرزمینی ترکیبی از این سه جزء می‌باشد. یافتن سهم این اجزاء در مشارکت جریان آب زیرزمینی در یک سیستم کارستی راهی جهت پی بردن به میزان توسعه آبخوان کارستی است. نتایج تحقیقات و شبیه سازی‌های انجام شده توسط ویلیام وایت و الیزابت وایت (White and White, 2005) نشان دهنده غالب بودن خیره کننده جریان در شکستگی‌ها در مرحله توسعه یک سفره کارستی می‌باشد.

آنچه که در بیشتر سفره‌های توسعه یافته کارستی مشاهده شده است، تمرکز جریان زیرزمینی و انتقال از تعدادی گذرگاه محلی می‌باشد. اما در سفره‌های که عامل زمین شناسی از تمرکز جریان به یک مجرای کاندویت ممانعت می‌کنند بزرگ شدن شکستگی‌های موجب ایجاد غارهای پرپیچ و خم می‌شوند (White and White, 2005). در شرایطی که جریان آهسته و کم باشد آب از تخلخل بین دانه‌ای (ماتریکس یا زمینه) وارد مجاری می‌گردد اما در شرایط جریان سریع و آشفته، آب از مجاری وارد زمینه می‌گردد (Martin and Sreaton, 2001) به نقل از کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹؛ Karami, 2002). از طریق مطالعه هیدروگراف چشمه‌های کارستی می‌توان سهم هر یک از انواع جریان را در

آبخوان مورد مطالعه برآورد نمود. شکل هیدروگراف یک چشمه نشان دهنده خصوصیات هیدرولیکی آبخوان تغذیه کننده آن است. به ویژه شکل و نرخ افت منحنی فروکش^{۱۲} اطلاعات با ارزشی از خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان زهکشی شده توسط چشمه را فراهم می‌کند.

۲-۷-۱- تأثیر عوامل ساختاری در جریان آب زیرزمینی در کارستاها

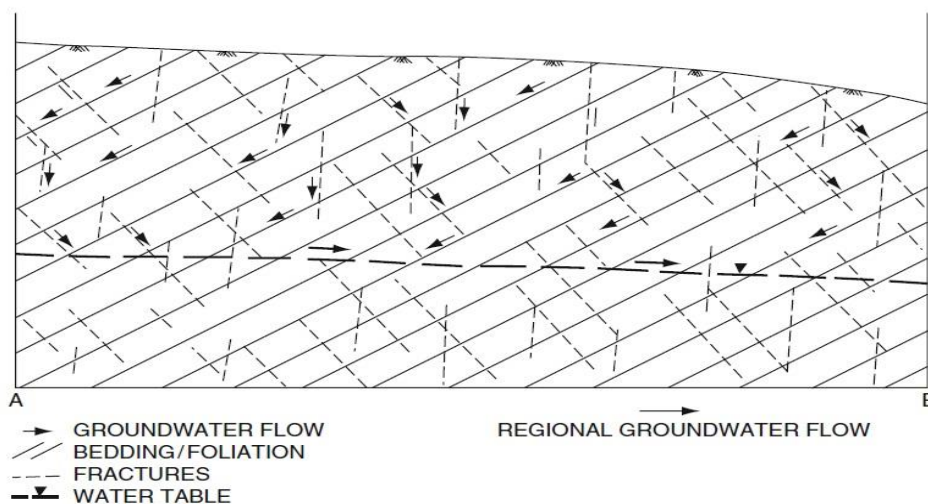
لیتولوژی و اشکال ساختاری (Structural feature) بیشترین تاثیر را در تشکیل و توسعه در نواحی کارستی دارند (Ford and Williams, 2007). شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها از ساختارهای مهم و با اهمیت لایه‌های زمین در علم هیدروژئولوژی می‌باشند و به طور طبیعی بسیاری از سنگ‌ها دارای شکستگی می‌باشند که به عنوان ذخیره کننده و یا جریان آب عمل می‌کنند. رخ‌ها، برگ‌ها، وارگی‌ها، درزه‌ها، صفحه‌های لایه بندی، مناطق برشی (Shear zones)، گسل‌ها و ارتباط لایه‌ها (Contacts) از مهمترین شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها می‌باشند. رخ‌ها و برگ‌ها را می‌توان در مقیاس میکروسکوپی و نمونه دستی و سایر موارد را در مقیاس ناحیه‌ای بررسی کرد. تخلخل، نفوذپذیری و جریان آب وابسته به شکستگی سنگ‌ها می‌باشد. موقعیت و جهت‌گیری ساختارها در جهت جریان آب زیرزمینی بسیار مهم می‌باشند (Babiker and Gudmundsson, 2004). به طور کلی جریان آب در سنگ‌های دارای شکستگی، در طول درزه‌ها، شکستگی‌ها، نواحی برشی (shear zones)، گسل‌ها و دیگر ناپیوستگی‌ها صورت می‌گیرد (Singhal and Gupta, 2010). فاکتورهای که در جریان آب در شکستگی‌ها تاثیر گذار هستند شامل فشارش، دما، زبری، هندسه شکستگی‌ها، تقاطع‌ها و غیره می‌باشند. مقدار بازشدگی شکستگی‌ها و سرعت جریان رابطه مستقیم دارند. دیواره‌های غیر موازی (Non-parallelism walls) و زبری دیوارها باعث افزایش اصطکاک می‌شود. هدایت هیدرولیکی در شکستگی‌ها رابطه عکس با فشارش‌های عمودی و عمقی دارد زیرا فشارش‌های عمودی باعث بسته شدن شکستگی‌ها و کاهش هدایت هیدرولیکی می‌شود. نفوذپذیری شکستگی‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد و از آنجا که با افزایش عمق دما افزایش می‌یابد لذا انبساط سنگ‌ها صورت گرفته و سبب

¹² Recession curve

کاهش مقدار باز شدگی سنگ‌ها و کاهش نفوذپذیری می‌شود، علاوه بر موارد ذکر شده مقدار سیمان شدگی، پر شدگی، سن و مقدار هوازگی بر نفوذپذیری شکستگی‌ها تاثیرگذار هستند (Singhal and Gupta, 2010). تعداد و فراوانی شکستگی‌های موازی در همسویی (Isotropy) توده سنگ تاثیرگذار است. به عبارت دیگر هرچه فراوانی و تعداد شکستگی‌های مرتبط با هم بیشتر باشد توده سنگ به سوی کاهش ناهمسویی (Anisotropy) پیش می‌رود. افزایش طول، فراوانی و مقدار بازشدگی شکستگی‌ها باعث افزایش هدایت هیدرولیکی می‌شود. بنابراین به طور خلاصه در مطالعه هیدروژئولوژیکی مناطق کارستی پی بردن به ساختارهای توده سنگ، تعداد و فراوانی شکستگی‌ها و توصیف الگو و روند آن‌ها بسیار مهم می‌باشد (Singhal and Gupta, 2010). تاثیر ساختارها به طور خلاصه در زیر توضیح داده شده است.

۲-۷-۱-۱- صفحه‌های لایه‌بندی

لایه بندی‌های اولیه در هنگام نهشته شدن رسوبات موجب تشکیل صفحه‌های لایه بندی می‌شود. لایه‌بندی‌ها را می‌توان در صحرا با کانی‌شناسی، ترکیب و بافت به راحتی از همدیگر متمایز ساخت. لایه‌بندی‌ها باعث ناپیوستگی‌های مهم، ناهمسویی در توده سنگ شده و تاثیر بسیار زیادی در جریان آب در منطقه غیراشباع دارد. آب‌های زیرزمینی به وسیله آن‌ها جریان می‌یابد و به عمق‌های بیشتر نفوذ می‌کند که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است (Singhal and Gupta, 2010). صفحه‌های لایه بندی نقش اتصال دهنده ریز درزه‌های که عمل نفوذ عمقی آب در منطقه غیر اشباع را بازی می‌کنند، دارد. هر چه شیب صفحه‌های لایه بندی بیشتر باشد در ایجاد مسیرهای جریان آب زیرزمینی و تغذیه



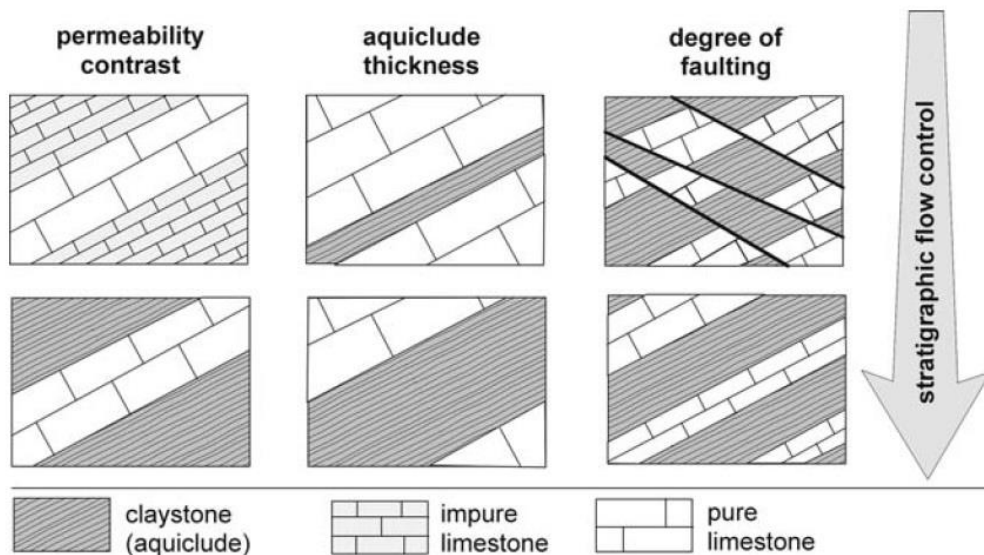
شکل ۲-۲- نقش صفحه های لایه بندی و شکستگی ها بر جریان آب زیرزمینی در منطقه غیر اشباع (Singhal and Gupta, 2010)

۲-۷-۱-۲- چین خوردگی ها

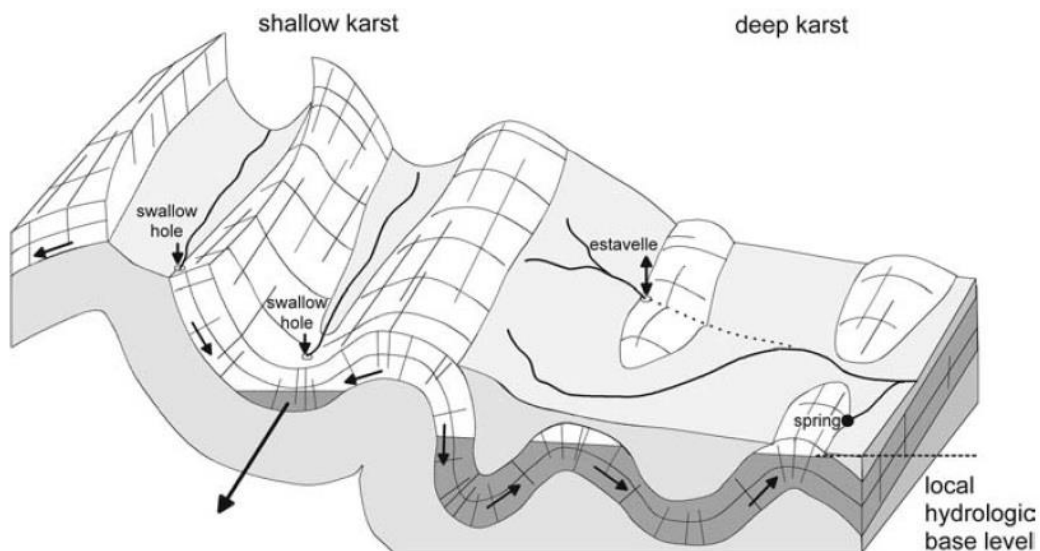
چین خوردگی ها باعث تغییر و یا معکوس کردن جهت شیب یال ها، تغییر در هندسه سفره ها، ذخیره آب های زیرزمینی، الگو و طرح خروجی آب های زیرزمینی می شوند. ترسیم و آنالیز ساختارهای چین از قبیل دامنه، طول چین، ارتباط جانبی و زاویه محور (پلانژ) چین با اهمیت می باشند (Goldscheider and Drew, 2007). تاثیر چین ها در الگوی زهکشی و خروجی آب های زیرزمینی در سیستم سفره های کارستی کم عمق با درجه کنترل چینه نگاری بالا، زیاد می باشد. اما در سفره های کارستی عمیق یا سفره های با درجه کنترل چینه نگاری پایین، محدود می باشد. شکل (۲-۳) تاثیر کنترل چینه نگاری را بر جریان آب زیرزمینی در یک سکانس سنگ آهک با شیل های نفوذناپذیر نشان می دهد. در صورتی که در این سکانس فرضی گسل خوردگی وجود داشته باشد یا ضخامت لایه نفوذناپذیر کم و یا نفوذپذیری لایه ها تفاوت زیادی نداشته باشد تاثیر چینه شناسی بر جریان آب زیرزمینی محدود می باشد. بنابراین جریان آب زیرزمینی از عرض لایه ها ممکن است صورت گرفته و از روند چینه شناسی منطقه تبعیت نمی کند. اما در صورتی که ضخامت لایه نفوذناپذیر زیاد و گسلی در این سکانس عمل نکرده باشد تاثیر چینه شناسی بر جریان آب زیرزمینی بالا می باشد و جریان آب زیرزمینی از روند چینه شناسی تبعیت می کند. بنابراین در زون های سطحی و عمیق چین خوردگی- های با درجه کنترل چینه نگاری بالا الگوهای متفاوتی از جریان می تواند وجود داشته باشد (شکل ۲-۴). در زون سطحی کارست، جایی که پایین ترین سطح سفره کارستی بالاتر از سطح اساس هیدروژئولوژیکی باشد، جریان آب زیرزمینی در نزدیکی کف سفره و جریان های سطحی بر روی لایه نفوذناپذیر جریان می یابد. شیب ناودیس ها مسیرهای اصلی جریان آب زیرزمینی را کنترل می کنند و

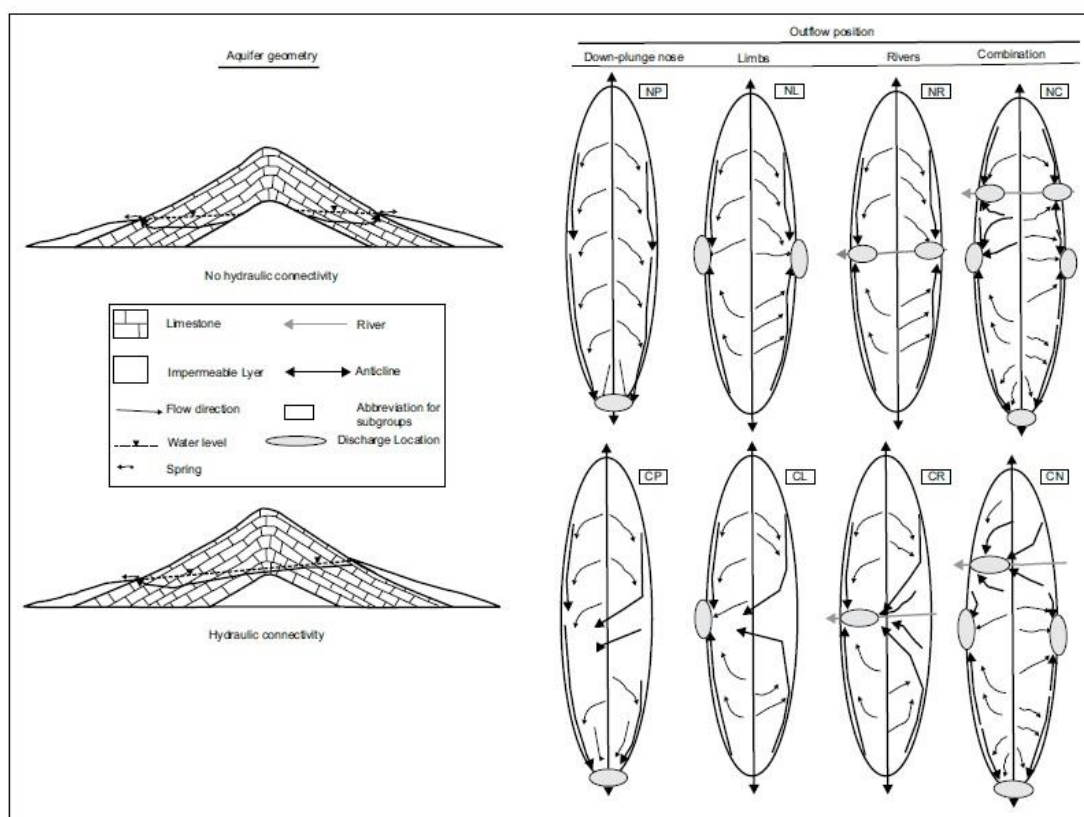
تاقدیس‌ها به عنوان خط تقسیم‌های محلی عمل می‌کنند. جریان‌های سطحی ممکن است در طول تاقدیس‌ها، جایی که سفره کارستی فرسایش یافته و یا در طول ناودیس‌های محبوس و پوشیده با لایه‌های نفوذناپذیر جریان یابد.

در زون‌های عمیق سفره‌های کارستی چین خورده، ناودیس‌ها غالباً "از آب‌های زیرزمینی اشباع می‌باشند که در این صورت می‌تواند از تاقدیس مجاور جریان یابد و به ناودیس دیگر وارد گردد. در زون‌های عمیق کارستی جریان از عرض چین (Across the fold) ممکن است صورت گیرد (Goldscheider and Drew, 2007).



شکل ۲-۳- تاثیر کنترل چینه‌شناسی بر جریان آب زیرزمینی (Goldscheider and Drew, 2007)



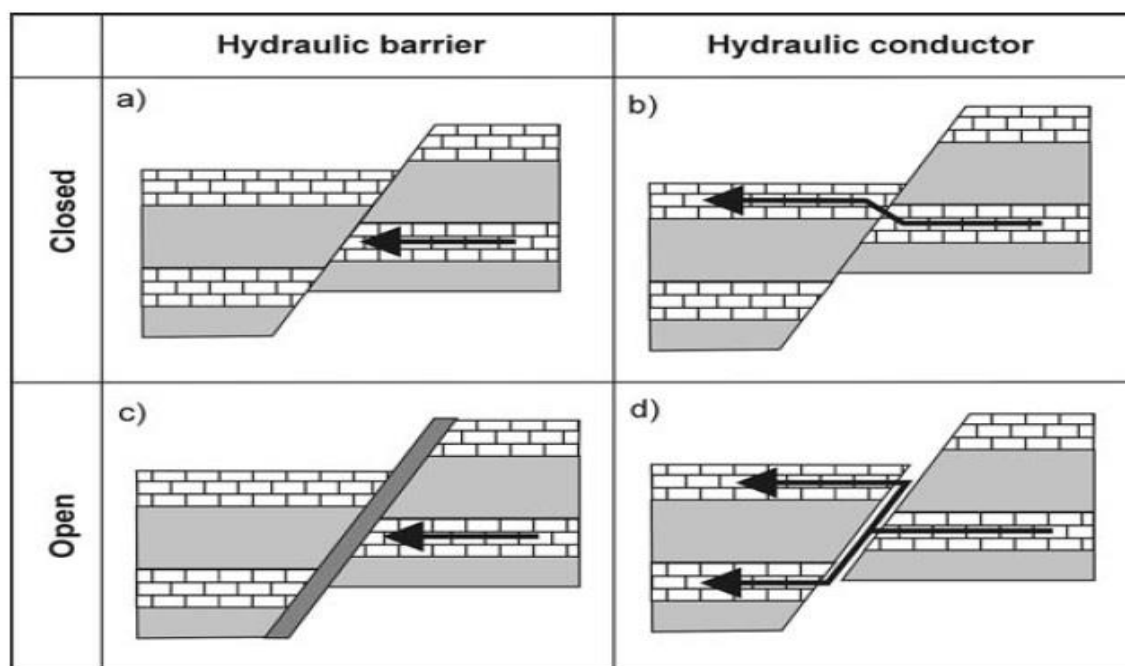


شکل ۲-۵- مدل جریان‌های آب زیرزمینی در تاق‌دیس‌های زاگرس (Ashjari and Raesi, 2006)

۲-۷-۱-۳- گسل‌ها

در مطالعات هیدروژئولوژی پی بردن به نقش گسل‌ها و تاثیر آن‌ها در جریان آب زیرزمینی بسیار مهم می‌باشد. بسیاری از چشمه‌های کارستی در اثر عملکرد گسل‌ها ایجاد می‌شوند. تاثیر هیدروژئولوژیکی گسل‌ها وابسته به سه عامل است (۱) عرض بازشدگی صفحه گسلی (۲) وجود یا عدم وجود مواد پرکننده (۳) مقدار جابه‌جایی گسل (Herold, et al. 2000 اقتباس از Goldscheider and Drew, 2007) با این حال گسل‌ها با تغییر وضعیت زمین می‌توانند نقش‌های متفاوتی در جریان‌های زیرزمینی داشته باشند. کاستینینگ (Kastning, 1997) گسل‌ها را بر اساس تاثیر در جریان آب زیرزمینی به سه دسته تقسیم کرده است (۱) گسل‌های با تاثیر مثبت، گسل‌های با سیستم شکستگی

باز می‌باشند که در نتیجه نیروهای کششی ایجاد می‌شوند و در جریان آب زیرزمینی تاثیرگذار می‌باشند (۲) گسل‌های با تاثیر منفی، در نواحی که توده آهک در صفحه گسلی تحت فشار قرار گیرد و آهک تبلور مجدد یا میلونیتی یابد، باعث ممانعت از جریان یا مسدود شدن و انحراف جریان آب‌های زیرزمینی می‌شود (۳) گسل‌های بدون تاثیر، این گسل‌ها در جریان آب زیرزمینی نقشی ندارند و تعداد این گسل‌ها بسیار نادر می‌باشند و اثبات بی‌تاثیری گسل در جریان آب زیرزمینی نیاز به اسناد معتبر تغییر نکردن نفوذپذیری و ذخیره آبخوان دارد. بین نوع گسل از نظر تکتونیکی، نرمال، معکوس و امتدادلغز و اثر هیدروژئولوژیکی آن ارتباط خاصی وجود ندارد بلکه مهم‌ترین پارامتر، پرشدگی یا بازشدگی در راستای گسل می‌باشد (White 2003). گولدشیدر و درو (Goldscheider and Drew, 2007) بیان کرده‌اند که گسل‌های نرمال بسته و باز می‌توانند در موقعیت‌های مختلف هم به عنوان مانع و هم انتقال دهنده جریان آب زیرزمینی عمل کنند (شکل ۲-۶). در تقابل مابین لایه‌بندی و گسل خوردگی و برتری نقش آن‌ها بر آب زیرزمینی نمی‌توان یک ملاک مشخص قرار داد زیرا عملکرد آن‌ها مستقل از هم نمی‌باشد.



شکل ۲-۶- عملکرد یک گسل نرمال در شرایط بسته یا باز بودن صفحه گسلی در جریان‌های زیرزمینی (Goldscheider and Drew, 2007)

تأثیر زون گسلی بر جریان آب زیرزمینی می‌تواند پیچیده باشد برای مثال قسمت‌های از زون گسلی ممکن است با نفوذپذیری پایین خود به عنوان مانعی در جهت جریان آب زیرزمینی عمل کند در حالی که سایر قسمت‌های دیگر با نفوذپذیری بالای خود به عنوان مسیر انتقال دهنده جریان آب زیرزمینی عمل نمایند (Babiker and Gudmundsson, 2004). زون گسلی در شرایطی که نفوذپذیری آن بیشتر از سنگ میزبان باشد و یا جهت آن در جهت شیب هیدرولیکی باشد می‌تواند به عنوان مسیر ترجیحی مهمی جهت انتقال آب باشد. مطالعات نشان داده است که گسل‌های فعال یا گسل‌های دارای پتانسیل فعال به طور عمده جریان آب زیرزمینی را در سنگ بستر کنترل می‌کند (Mayer and Sharp, 1998; Gudmundsson, 2000). همچنین نقش گسل‌ها در جابه‌جایی چینه‌ها و لایه‌های زمین بسیار مهم می‌باشند. سینقال و گوپتا (Singhal and Gupta, 2010) حالت‌های مختلف تأثیر گسل بر جریان آب زیرزمینی را بیان کرده‌اند (شکل ۲-۷)

- ۱- گسل‌ها ممکن است باعث بریدن، جابه‌جائی، تکرار و حذف لایه‌ها شوند. در این حالت توزیع و رخداد سفره‌ها ممکن است به صورت ناحیه‌ای تحت تأثیر گسل قرار گیرد و لایه‌های سفره ممکن است جابه‌جا، بریده یا حذف شوند (شکل ۲-۷. الف و ب)
- ۲- گسل ممکن است سنگ‌های نفوذناپذیر را در مقابل آبخوان آورده و در جریان و توزیع آب-های زیرزمینی تأثیرگذار باشد (شکل ۲-۷. الف)
- ۳- بریدن یک سفره توسط گسل ممکن است منجر به تراوش و تشکیل چشمه‌ها به صورت خطی در طول گسل شود (شکل ۲-۷. ج)
- ۴- گسل ممکن است منجر به ایجاد شیب‌های تند یا بریدگی عمودی لایه‌ها شود. در این صورت فرسایش شدید بلوک کمر بالا و رسوب گذاری شدید واریزه‌ها در بلوک کمر پایین سبب نهشته شدن واریزه و تشکیل سفره‌های آبدار مناسب شود (شکل ۲-۷. د).

۲-۸- شاخص کارستی شدن

طبق تعریف ساده می‌توان شاخص کارستی شدن را معیاری جهت ارزیابی کمی و کیفی مناطق کارستی بیان کرد. همانگونه که در بحث‌های قبل اشاره شد ارزیابی میزان کارستی شدن نواحی کارستی بیشتر بر ارزیابی‌های شخصی و تجربه‌های فردی استوار بوده است. اینگونه ارزیابی‌ها منجر به اختلاف نظرها و ارزیابی نادرست از میزان کارستی شدن نواحی کارستی می‌شود. ارزیابی علمی مناطق کارستی بر پایه ضرایب و شاخص‌های که بیانگر خصوصیات نواحی کارستی می‌باشد به دور از نظرات شخصی می‌باشد. جهت ارزیابی شاخص کارستی می‌توان از عوارض سطحی همانند، فراوانی و تراکم فروچاله‌ها و دولین‌ها و چگالی شکستگی‌ها استفاده کرد جهت ارزیابی شاخص کارستی شدگی درونی آبخوان‌های کارستی می‌توان از هیدروگراف چشمه و روابط هیدروگراف و کموگراف استفاده کرد.

۲-۸-۱- شاخص کارستی شدن شکستگی‌ها

فروچاله‌ها (سینک هول‌ها) از بیشترین و رایجترین اشکال سطحی مناطق کارستی می‌باشد. فراوانی و اندازه فروچاله‌ها نشان دهنده درجه‌ای از انحلال‌های زیرزمینی می‌باشد. کل تعداد فروچاله‌ها تقسیم بر مساحت منطقه مطالعه را تراکم فروچاله‌ها گویند. نسبت مساحت فروچاله^{۱۳} برابر مساحت کل فروچاله‌ها به مساحت منطقه مورد مطالعه می‌باشد. گرگوری شوفنر و همکاران (Gregory, A,) (Shofner. et al, 2001) شاخص کارستی شدن فروچاله‌ها را در تنسیس (Tennessee) محاسبه کرده‌اند. آن‌ها در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای و منحنی‌های بسته نقشه توپوگرافی استفاده کرده‌اند. به دلیل سهولت شمارش فروچاله‌ها نسبت به اندازه‌گیری مساحت آن‌ها استفاده از تراکم فروچاله‌ها رایجتر می‌باشد. در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان به دلیل نبود فروچاله از روش‌های دیگر محاسبه شاخص کارستی شدن سطحی در این مطالعه استفاده شده است.

¹³ Sinkhole area ratio

علوی و چابانی (Aloui and Chaabani, 2006) بیان کرده‌اند که شاخص کارستی شدن یک شکستگی در شبکه شکستگی‌ها با مقدار بازشدگی و شدت شکستگی‌ها ارتباط دارد. آن‌ها جهت محاسبه شاخص کارستی شدن شکستگی‌های منطقه کارستی جبل فریانا (Jebel Feriana) در تونس از رابطه (۵-۲) استفاده کرده‌اند.

$$I_k = oI_f \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

در این معادله I_k ^{۱۴} شاخص کارستی شدن، O ^{۱۵} میانگین باز شدگی دسته شکستگی‌های هم جهت و I_f ^{۱۶} شدت شکستگی‌ها می‌باشد. در واقع شدت شکستگی‌ها بیان توصیفی از خصوصیات شکستگی‌های منطقه می‌باشد که در یک مکان ویژه با مساحت (s)، تعداد لایه‌های موجود (n_c)، تعداد شکستگی‌های موجود (n) با فاصله بین شکستگی‌ها (e) در جهت یکسان، از رابطه (۶-۲) محاسبه می‌شود.

$$I_f = \frac{nn_c}{se} \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

دسته شکستگی‌های متقاطع باعث افزایش شدت شکستگی می‌شود. به طور کلی کارستی شدن پدیده‌ای محلی است و شدت شکستگی‌ها وابسته به تجمع تاثیرات در جهت‌های شکستگی می‌باشد. با تلفیق رابطه‌های (۵-۲) و (۶-۲) رابطه (۷-۲) نتیجه می‌شود که به سهولت می‌توان جهت محاسبه شاخص کارستی شدن شکستگی‌های یک منطقه استفاده کرد.

$$I_k = \frac{n_c}{s} \sum_{i=1}^j \frac{f_i}{e_i} o_i \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

I_k = شاخص کارستی شدن n_c = تعداد لایه‌ها در دسته‌های جهت بندی

¹⁴ Karstification index

¹⁵ opening

¹⁶ Fracture intensity

$S =$ مساحت اندازه‌گیری (k_m) $e_i =$ میانگین فاصله بین شکستگی در دسته i ام (m)

$f_i =$ تعداد دسته درزه‌های هم جهت $O_i =$ میانگین باز شدگی شکستگی‌ها در دسته i ام (m)

$i =$ عدد مثبت تعداد دسته شکستگی‌ها $j =$ عدد مثبت تعداد دسته‌های جهت بندی شکستگی‌ها

با محاسبه شاخص کارستی شدن (رابطه ۲-۷) و استفاده از جدول (۲-۱) می‌توان در مورد وضعیت توسعه کارستی شدگی یک منطقه اظهار عقیده کرد.

جدول ۲-۱- وضعیت کارستی شدن بر اساس شاخص کارستی شدن شکستگی‌ها (Aloui and Chaabani, 2006)

I_k	[۰-۲۵۰]	[۲۵۰-۷۵۰]	[۷۵۰-۱۵۰۰]	[۱۵۰۰-۳۰۰۰]	[۳۰۰۰ - +∞]
وضعیت کارستی شدن	کارستی نشده	کم کارستی شده	نسبتاً کارستی شده	خوب کارستی شده	خیلی کارستی شده

۲-۸-۲- آنالیز هیدروگراف چشمه و منحنی‌های فرود

به دلیل ناهمگنی سیستم‌های کارستی نمی‌توان خصوصیات هیدروژئولوژیکی داده‌های نقطه‌ای مثل آزمون پمپاژ را به کل سیستم تعمیم داد، در حالیکه رفتار منحنی فروکش هیدروگراف چشمه‌های تخلیه‌کننده این آبخوان‌ها به خوبی نماینده خصوصیات هیدرودینامیکی کل آبخوان می‌باشد. با آنالیز هیدروگراف (مقدار آبدهی) چشمه‌های کارستی و نرخ کاهش شاخه نزولی فروکش دبی (از حداکثر آبدهی در پایان دوره تر تا افزایش دوباره) می‌توان اطلاعات قابل توجهی از ذخیره و خصوصیات ساختاری داخلی آبخوان کارستی بدست آورد (Bonacci, 1993). منحنی فرود چشمه کارستی منعکس‌کننده خصوصیات داخلی آبخوان می‌باشد که بسیاری از نویسندگان از آن جهت بررسی تراوایی و خصوصیات ذخیره آبخوان استفاده کرده‌اند (Bonacci, 1993; Atkinson, 1977). همانگونه که قبلاً ذکر شد عوامل و فاکتورهای مختلف بیرونی و درونی موثر بر توده آبخوان در توسعه کارستی

دخیل هستند. بارندگی مهمترین عامل بیرونی توسعه کارست است (سایر عوامل از قبیل شیب، پوشش گیاهی و ... در زمان‌های زمین‌شناسی ممکن است تغییر محسوسی داشته باشند). با آنالیز منحنی فرود چشمه کارستی در دوره خشک می‌توان اثر عامل بارندگی را حذف و عوامل درونی موثر در توسعه آبخوان را بررسی کرد. با استفاده از منحنی فرود چشمه می‌توان به خصوصیات ساختاری، تراوایی و حجم ذخیره دینامیک آبخوان کارستی پی برد. جهت ترسیم منحنی فرود چشمه، آبدهی چشمه را در یک دستگاه نیمه لگاریتمی رسم می‌گردد. چنین نموداری به صورت یک خط مستقیم و یا یک خط شکسته با شیب‌های مختلف ظاهر می‌شود. شیب خط یا خطوط شکسته شده ضرایب تخلیه می‌باشد. این ضرایب توانایی سفره برای آزاد کردن آب و خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان یعنی تخلخل موثر و قابلیت انتقال آبخوان را بیان می‌کند (Ford and Williams, 2007; Atkinson, 1977). اگر تغییرات مقدار آبدهی چشمه (هیدروگراف) در کنار تغییرات زمانی کیفیت آب (کموگراف) مورد بررسی قرار گیرد اطلاعات مهمی از وضعیت درونی آبخوان کارستی بدست می‌آید.

۸-۲-۱- استفاده از روش Maillet برای آنالیز منحنی فرود چشمه

میلت (Maillet, 1905) اولین کسی بود که بیان کرد، تخلیه از یک چشمه تابعی از حجم آبی است که در ذخیره آبخوان وجود دارد (سامانی و زارعی، ۱۳۸۵). وی این ارتباط را در یک تابع نمایی ساده،

$$Q_t = Q_0 e^{\alpha(t-t_0)} \quad \text{رابطه (۸-۲)}$$

در این رابطه

Q_0 = آبدهی چشمه در زمان t بر حسب (m^3/s)

Q_t = آبدهی چشمه در طول دوره $t-t_0$ (m^3/s)

t = زمان پایدار دوره محاسبه

t_0 = زمان شروع محاسبه تخلیه آب از آبخوان

e = پایه لگاریتم طبیعی

α = ضریب تخلیه آبخوان یا ضریب فروکش

با تغییر رابطه بالا به صورت رابطه (۹-۲) و در نهایت رابطه (۱۰-۲) ضریب فروکش آبخوان محاسبه می‌شود

$$\log Q_1 = \log Q_0 - \text{رابطه (۹-۲)}$$

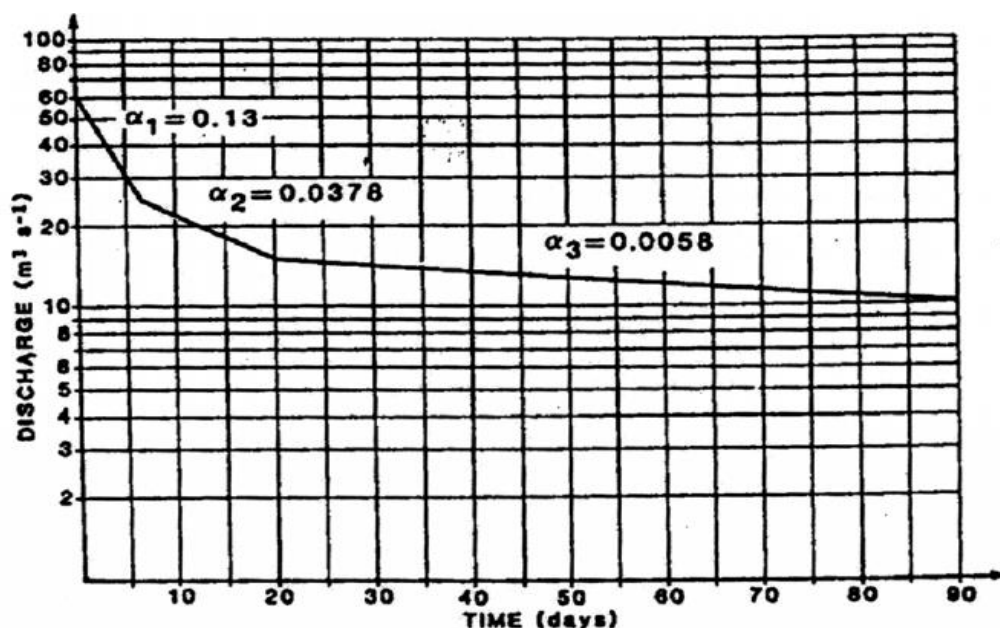
$$\alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0.4343(t_2 - t_1)} \quad \text{رابطه (۱۰-۲)}$$

با ترسیم منحنی بر روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی خط صافی مشخص می‌گردد که شیب آن برابر با ضریب فروکش آبخوان می‌باشد. شیب کم منحنی فرود می‌تواند دلالت بر ذخیره دینامیکی زیاد آبخوان باشد اما شیب زیاد منحنی فرود نشان دهنده موقت بودن ذخیره دینامیکی و تخلیه سریع می‌باشد (Milanovic, 1981). در صورتی که α بزرگ و t کوچک باشد نمودار شیب زیادی خواهد داشت که نشان دهنده تخلیه سریع از مجاری بزرگ کاندویت و ذخیره کم آبخوان می‌باشد. اگر α کوچک و t بزرگ باشد نمودار شیب کم خواهد داشت که نشان دهنده تخلیه آرام و انتقال جریان از شبکه ای از شکاف ها و حفرات به هم پیوسته با ضریب ذخیره بالای آبخوان است. در صورتی که آبخوان کارستی دارای رژیم های جریان متفاوتی باشد منحنی فروکش ترسیم شده دارای دو یا سه خط شکسته با شیب های مختلفی می‌باشد که شیب هر قسمت بیان کننده ذخایر گوناگون موجود در سیستم است. در این حالت دبی جریان خروجی از رابطه (۱۱-۲) محاسبه می‌شود.

$$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + \dots + Q_{0n}e^{-\alpha_n t} \quad \text{رابطه (۱۱-۲)}$$

Milanovic (1976) در آنالیز هیدروگراف چشمه‌های Ombla در یوگوسلاوی از رابطه (۱۱-۲) استفاده کرده است. شکل ۸-۲ نشان دهنده رژیم خروجی این چشمه است که میلانویچ منحنی فروکش آن را اینگونه تفسیر کرده است. در این شکل α_1 نشان دهنده عکس العمل سریع تخلیه از کانال ها و غارهای بزرگ زیرزمینی است که در عرض چند روز حجم عظیمی آب تخلیه می‌شود. α_2 نشان

دهنده تخلیه از شکاف‌های کارستی به هم پیوسته است که تخلیه حجم این شکستگی‌ها حدود ۱۳ روز طول کشیده است. α_3 نشان دهنده زهکشی و خروج آب از حفرات و شکاف‌های باریک با حجم عظیمی از آب می‌باشد.

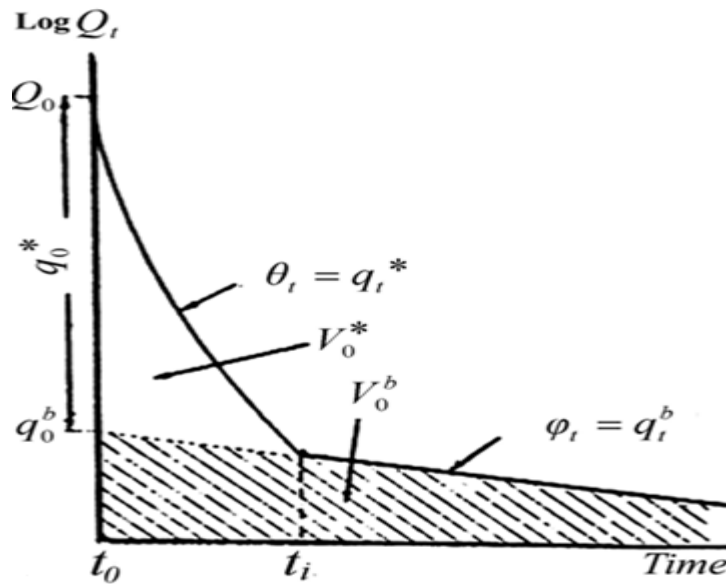


شکل ۲-۸- رژیم‌های مختلف تخلیه آب در چشمه Ombla (Milanovic, 1976)

۲-۸-۳- استفاده از روش MANGIN برای آنالیز منحنی فرود چشمه

منجین (Mangin, 1975) منحنی فرود چشمه‌های کارستی را متشکل از جریان سریع و جریان پایه می‌داند و وی اظهار داشت که جریان سریع (غیر خطی) در محیط غیر اشباع و جریان پایه (خطی) در محیط اشباع برقرار است و فرضیه میلر و وجود رابطه خطی بین بار هیدرولیکی و نرخ جریان را فقط در جریان پایه قبول داشت. به عبارت دیگر زهکشی زون غیر اشباع، منحنی فروکش غیر خطی دارد که به صورت تابع θ_f نشان داده می‌شود و زون اشباع منحنی فروکش خطی دارد که به صورت تابع φ_f نشان داده می‌شود. و لذا برای هر کدام از دو محیط روابط جداگانه‌ای در نظر گرفت و دبی

خروجی را مجموع جبری دو جریان سریع و پایه قرار داد (رابطه ۲-۱۲). شکل ۲-۹ اجزا منحنی فرود را در روابط منجین نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹- اجزاء منحنی فرود در روابط Mangin

$$Q_t = \varphi_t + \theta_t \quad \text{رابطه (۲-۱۲)}$$

φ_t را می‌توان با استفاده از معادله میلِت (Maillet, 1905) طبق رابطه (۲-۱۳) محاسبه کرد

$$\varphi_t = q_t^b = q_0^b \exp(-at) \quad \text{رابطه (۲-۱۳)}$$

در این رابطه q_0^b و q_t^b به ترتیب نرخ جریان پایه (base flow) در زمان‌های $t=0$ و t می‌باشد.

منجین تابع θ_t را به صورت رابطه (۲-۱۴) نیز تعریف کرد.

$$\theta_t = q_t^* = q_0^* \frac{1 - \mu t}{1 + \epsilon t} \quad \text{رابطه (۲-۱۴)}$$

در این رابطه q_t^* و q_0^* به ترتیب نرخ جریان سریع (quick flow) در زمان t و $t=0$ می‌باشد. μ عکس t_i است که مدت زمان جریان سریع است. ضریب ε ضریب تقعر منحنی جریان سریع است.

مالک (Malik, 2007) جهت تعیین حساسیت آلودگی چشمه های کارستی منطقه (Velka Fatra) در اسلواکی با استفاده از آنالیز ۲۰۹ منحنی فرود ۲۰ چشمه کارستی که هر هفته به مدت ۳ الی ۳۱ سال اندازه گیری شده است، درجه کارستی شدن هر چشمه را تعیین کرده است. تعیین درجه کارستی شدن حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی با آنالیز منحنی فرود، اولین بار توسط کولمن (Kullman, 2000) در ۱۰ درجه بر اساس ضرایب بدست آمده از منحنی فرود چشمه تعیین شده است که بعداً مالک (Malik, 2007) با بسط آن این درجه بندی را کامل و رژیم های جریان زیرزمینی ممکن برای هر درجه از توسعه کارست را بیان نموده است (جدول ۲-۲). در منطقه مطالعاتی مذکور با بارش ۱۴۰۰-۱۰۰۰ میلی متر در ارتفاعات و ۷۰۰-۱۰۰۰ میلی متر در کمترین ارتفاعات بالاترین درجه کارستی شدن ۵/۵ می‌باشد. بنابراین نتیجه شده است که فرآیند توسعه کارست در این منطقه هنوز مجاری بزرگ کارستی را تشکیل نداده است که به دلیل وجود میان لایه‌های دولومیت در لیتولوژی منطقه می‌باشد. در مواردی، آنالیز چشمه‌ها به صورت ادغامی^{۱۷} حقایق جدیدی آشکار شده است. مطالعات مالک و وچتکوا (Malik and Vojtkova, 2010) در جنوب اسلواکی بر روی ۹ چشمه کارستی و بررسی هیدروگراف منحنی فروکش این چشمه ها به صورت جداگانه و به صورت ادغامی، دو چشمه که در نزدیک هم واقع شده بودند به نتایج جالب توجه‌ای نائل شد. در منحنی فروکش این دو چشمه به صورت مجزا رژیم جریان خطی (لامینار) با درجه کارستی شدن پایین نتیجه می‌شد اما با ادغام دبی خروجی این دو چشمه و بررسی منحنی فروکش آن‌ها، وجود یک رژیم جریان توربولنت (آشفته) با درجه کارستی شدن بالا مشاهده می‌شد. آن‌ها با مشاهده این واقعیت به این نتیجه رسیدند که این دو چشمه نشان دهنده دو شاخه جدا از یک خروجی اصلی می‌باشند که چشمه پایینی دارای جریان پایه و چشمه بالای دارای جریان سریع می‌باشد.

¹⁷ Coupling

جدول ۲-۲- درجه کارستی حوضه آبخیز چشمه های کارستی با استفاده از ضرایب منحنی فرود (Malik, 2007)

Sensitivity degree	Characteristics of recession curve parameters	Groundwater flow regime type
* 0,5	$\alpha < 0,001$	Simple laminar, lower values of α_1 .
1	$\alpha = 0,001$ to $0,0025$	
2	$\alpha = 0,0025$ to $0,007$	
* 2,3	$\alpha > 0,007$	Simple laminar, higher values of α_1 .
* 2,5	$\alpha_1 < 0,0024$ and $\alpha_2 < 0,033$	Laminar - combination of two or more regimes with laminar flow characterized by different discharge coefficients, lower values of α_1 and α_2 .
* 2,7	$\alpha_1 < 0,0024$ or $\alpha_2 < 0,033$	
3	$\alpha_1 = 0,0024$ to $0,0045$; $\alpha_2 = 0,033$ to $0,067$	
* 3,5	$\alpha_1 = 0,0024$ to $0,0043$ and $\alpha_2 = 0,060$ to $0,16$	Laminar - combination of two or more regimes with laminar flow characterized by different discharge coefficients, higher values of α_1 and α_2 .
* 3,7	$\alpha_1 > 0,0043$ and $\alpha_2 < 0,060$	
4	$\alpha_1 = 0,0041$ to $0,018$ and $\alpha_2 = 0,055$ to $0,16$	
* 4,3	$\alpha_1 > 0,018$ or $\alpha_2 > 0,16$	Regime of groundwater discharge is composed from a sub-regime with turbulent flow and a sub-regime with laminar flow. Substantial role in groundwater discharge plays the sub-regime with laminar flow.
* 4,7	$\alpha_1 > 0,018$ and $\alpha_2 > 0,16$	
5	β and α - low values	
* 5,5	$\alpha_1 > 0$ and $\alpha_2 > 0$ and $\beta_1 > 0$	Complex groundwater discharge regime, a combination of one sub-regime with turbulent flow and two sub-regimes with laminar groundwater flow. Groundwater discharge sub-regimes with turbulent flow is in comparison with overall groundwater discharge of short-term influence.
6	β_2, β_1 and α_1, α_2 - high values	Very complex groundwater discharge regime, it is a combination of two sub-regimes with turbulent flow and two sub-regimes with laminar groundwater flow. Groundwater discharge sub-regimes with turbulent flow is in comparison with overall groundwater discharge of short-term influence..
7	$\beta_3, \beta_2, \beta_1$ and α - high values, $\beta_1 > \beta_2$	Groundwater discharge regime is a combination of sub-regime with laminar flow with two to three sub-regimes with turbulent flow. Substantial role in groundwater discharge plays the sub-regime with laminar flow.
8	$\beta_3, \beta_2, \beta_1$ and α - high values	Groundwater discharge regime is a combination of a sub-regime with laminar flow with two to three sub-regimes with turbulent flow. Main role in groundwater discharge is played by sub-regimes with turbulent flow. The sub-regime with laminar flow is substantially less significant.
* 8,5	α_1 ; $\alpha_2 = 0$ and $\beta_1 > 0$	Groundwater flow regime is represented only by turbulent flow, of only one turbulent flow sub-regime. It represents turbulent circulation channel systems (conduits) without hydraulic connection to the groundwater of adjacent rock blocks. It is mostly connected to vadose zone.
9	β_1, β_2 - low values	Groundwater flow regime is represented only by turbulent flow, consisting of two turbulent flow sub-regimes. It represents turbulent circulation channel systems (conduits) without hydraulic connection to the groundwater of adjacent rock blocks. It is mostly connected to vadose zone.
10	β_1, β_2 and β_3 - high values	Turbulent flow regime of groundwater discharge, consisting of three turbulent flow sub-regimes. Probability of a very complex regime of occasional groundwater flows in the vadose zone. So far, it is documented only in perennial flows.

این ارتباط‌های پیچیده جهت بررسی و کنترل حساسیت آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی و تحقیقات غار شناسی مفید می‌باشند.

۲-۸-۳- استفاده از هیدروگراف و کموگراف جهت بررسی توسعه کارست درونی

آلساندرو گراسو و همکاران (Alessandro Grasso *et al*, 2003) با استفاده از آنالیز دو پارامتر هیدروگراف و کموگراف چشمه‌های کارستی و محاسبه ضرایبی از روند تغییرات این خصوصیات در مرحله فروکش دبی به بررسی توسعه کارست پرداخته‌اند. در مرحله فروکش دبی چشمه به دلیل خالی شدن آب از سیستم کارستی، تغییرات غلظت شیمیایی در ارتباط با تغییرات دبی گویای ویژگی‌های سیستم کارستی می‌باشد. آنها با بررسی تغییرات غلظت کربنات نسبت به تغییرات دبی در مرحله فرود چشمه‌های کارستی ($CBRF^{18}$) دو پارامتر (A و α) را معرفی کرده‌اند. جهت بدست آوردن این دو پارامتر مقادیر غلظت انحلالی کربنات را در مقابل دبی در یک منحنی لگاریتمی ترسیم می‌شود، شیب خط بدست آمده برابر α و عرض از مبدا، A می‌باشد. پارامتر α وابسته به بعد هندسی ناحیه اشباع شبکه کارستی بوده ولی A وابسته به ابعاد شبکه کارستی که همان طول مجاری متخلخل (در واقع طول مسیر طی شده آب) و میزان باز شدگی مجرا می‌باشد. به طور تجربی نتیجه شده است که طی مرحله فرود دبی، تغییرات غلظت شیمیایی خروجی سیستم کارستی را می‌توان با توان منفی دبی جریان توصیف کرد (معادله ۲-۱۵) (Grasso and Jeannin, 1998) به نقل از Alessandro Grasso *et al*. 2003.

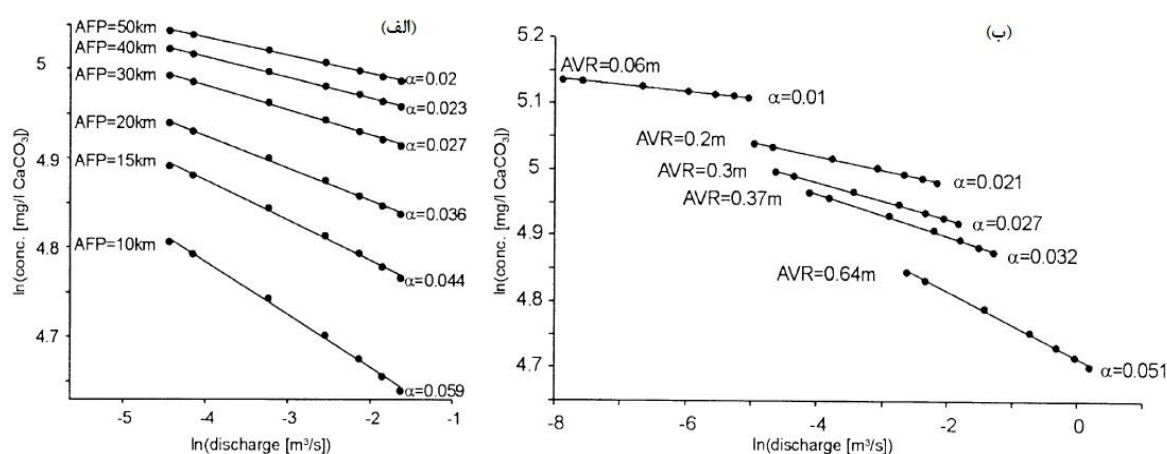
$$C = A \cdot Q^{-\alpha} = A e^{-\alpha \ln(Q)} \quad \text{معادله (۲-۱۵)}$$

$$C = \text{غلظت (mg/l)}, \text{ بعد (ML}^{-3}\text{)} \quad A = \text{ضریب تجربی، بعد (ML}^{3(\alpha-1)}\text{T}^{-\alpha}\text{)}$$

$$Q = \text{دبی خروجی (L}^3\text{T}^{-1}\text{)} \quad \alpha = \text{ضریب تجربی (بدون بعد)}$$

¹⁸ Chemically based recession flow

جهت برقراری ارتباط بین غلظت انحلالی و دبی خروجی در معادله (۲-۱۵)، تعیین دو پارامتر α و A لازم می‌باشد. جهت شبیه سازی دترمنستیک غلظت انحلالی سنگ آهک، شرایط زیر باید برقرار باشد. (۱) سرعت جریان به طور تقریب بین ۱-۰/۰۵ متر بر ثانیه متغیر باشد و (۲) محاسبات مدل تحت شرایط پایا باشد. غلظت Ca^{2+} بر اساس mg/l و سرعت جریان بر اساس m^3/l در یک منحنی لگاریتمی ترسیم می‌شوند (شکل ۲-۱۰).



ب) کاهش α با AFP شکل ۲-۱۰- تغییر در ضریب α در شرایط مختلف شبکه کارستی الف) کاهش α با افزایش AVR (Alessandro Grasso *et al.* 2003) کوچک تر بودن نسبت

نتایج مدل سازی در سه حالت متفاوت بررسی شده است.

حالت اول- مجاری کارستی را با AVR^{۱۹} برابر ولی AFP^{۲۰} متفاوت در نظر می‌گیریم

در مرحله فروکش دبی، غلظت افزایش یافته و مقادیر $\ln(C)/\ln(Q)$ در راستای خط راست قرار می‌گیرند (شکل ۲-۱۰، الف)، با افزایش طول مجاری متخلخل (AFP) مقدار مطلق α کاهش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش طول مجاری کارستی، سطح تماس آب با دیواره مجرا افزایش و در نتیجه غلظت جرمی کلسیت در خروجی مجرا بیشتر می‌شود. حتی اگر فلاکس حجمی (سرعت جریان) ثابت

¹⁹ Area volume ratio

²⁰ Average flow path

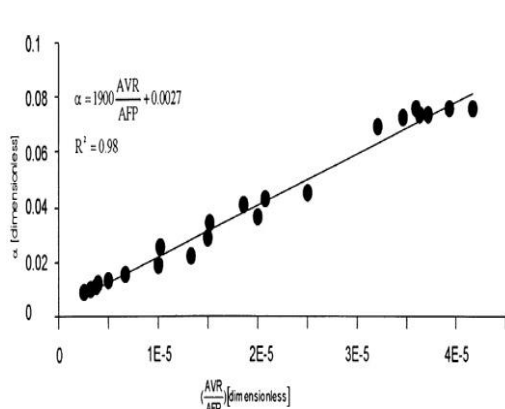
باقی بماند. نسبت فلاکس جرمی به حجمی و همچنین مقدار غلظت با افزایش طول مسیر جریان، افزایش می یابد.

حالت دوم- مجاری کارستی با AFP برابر ولی AVR متفاوت در نظر می گیریم در مرحله فروکش دبی، غلظت افزایش یافته و مقادیر $\ln(C)/\ln(Q)$ در راستای خط راست قرار می گیرند (شکل ۲-۱۰، ب)، با کاهش AVR مقدار مطلق α کاهش می یابد. این به این دلیل است که غلظت جرمی انحلال کلسیت در خروجی سیستم وابسته به مساحت جانبی شبکه مجاری کارستی می باشد اما فلاکس حجمی وابسته به مقدار بازشدگی شبکه مجاری می باشد. در نتیجه برای شبکه های کارستی با AFP برابر رابطه بین مساحت جانبی به باز شدگی مجاری با افزایش AVR، کاهش می یابد. در نتیجه نسبت فلاکس جرمی به حجمی و همچنین مقدار غلظت کاهش می یابد.

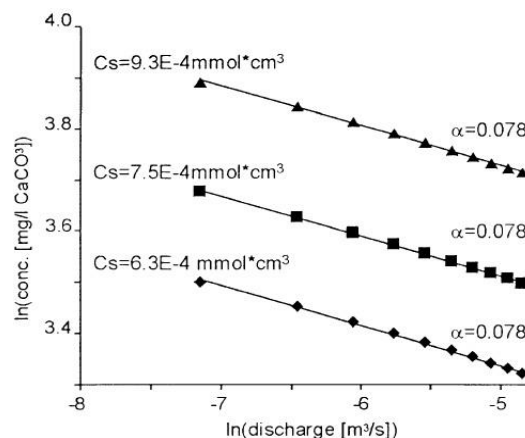
حالت سوم- شرایط هندسی شبکه کارستی (AFP و AVR) و شرایط هیدرولیکی (سرعت جریان) ثابت ولی غلظت های اشباع متفاوت در نظر گرفته می شود نمودار غلظت به دبی در شکل (۲-۱۱) نشان دهنده این است که با در نظر گرفتن غلظت های اشباع متفاوت نتایج بر روی خطوط مستقیم موازی با همدیگر با شیب های برابر (α برابر) ولی عرض از مبدا های متفاوت (A متفاوت) قرار می گیرند. در واقع با شرایط هیدرولیکی و هندسی مشابه، پارامتر A تنها وابسته به غلظت اشباع (انحلالی) است.

با توجه به شرایط ذکر شده بالا پارامتر α وابسته به ابعاد شبکه اشباع و هندسه آبخوان می باشد. در واقع با نسبت حجم به مساحت (AVR) شبکه مجاری رابطه مستقیم ولی با طول مسیر جریان (AFP) رابطه عکس دارد. برای شرایط هندسی شبکه مجاری کارستی مشابه، پارامتر A با غلظت اشباع کلسیت تغییر می کند. البته این پارامتر نیز به فاکتورهای دیگری همانند سرعت جریان، دما و فشار جزیبی دی اکسید کربن وابسته می باشد. دما و فشار جزیبی دی اکسید کربن وابسته به تغییرات فصلی و جهانی اقلیم می باشد. روند مقادیر A را می توان جهت نشان دادن تاثیرات تغییرات اقلیم بر آب های کارستی را نشان دهد (Grasso and Jeannin, 1998) به نقل از Alessandro Grasso *et al*,

2003). بر اساس نتایج ذکر شده، شکل (۲-۱۲) نشان دهنده یک ارتباط مستقیم خطی مقدار α با نسبت $\frac{AVR}{AFP}$ می‌باشد (معادله ۲-۱۶). با توجه به این معادله و شکل (۲-۱۲) مقدار c ، عرض از مبدا خط است که در مقابل α ناچیز و قابل نظر کردن بوده و مقدار a با سیستم‌های کارستی واقع مقدار ۱۹۰۰ بدست آمده است. که برابر شیب خط در شکل (۲-۱۲) است، بنابراین معادله (۲-۱۷) که ارتباط بین پارامترها را نشان می‌دهد بدست می‌آید. در این معادله α بدون بعد ولی بعد AVR و AFP متر می‌باشد.



شکل ۲-۱۲- ارتباط خطی بین α و نسبت $\frac{AVR}{AFP}$



شکل ۲-۱۱- تغییر در مقدار α با تغییر در غلظت انحلالی. برای شرایط هندسی مشابه، پارامتر α با غلظت‌های متفاوت، ثابت می‌ماند.

$$(\alpha + c) = a \frac{AVR}{AFP} \quad \text{معادله (۲-۱۶)}$$

$$\alpha = 1900 \frac{AVR}{AFP} \quad \text{معادله (۲-۱۷)}$$

گراسو و همکاران پیشنهاد کرده‌اند که مقدار تخمینی AFP برابر با جذر مساحت حوضه آبخیز سفره کارستی می‌باشد. و برای سفره‌های کارستی که مساحت حوضه آبخیز آن‌ها به درستی مشخص نیست

می‌توان برابر بیشترین فاصله طی شده توسط ردیاب دانست. در نتیجه با داشتن AFP و α می‌توان شاخص کارستی AVR را محاسبه و ارزیابی کرد. نتایج مدل سازی دترمنستیک آلکساندر گراسو و همکاران (Alessandro Grasso et al, 2003) برای پنج سیستم کارستی واقعی جهت ارزیابی AVR به کار برده شده است. نتایج مدل با نتایج داده‌های هیدروژئولوژیکی مطابقت داشته و به همین دلیل مقدار AVR که وابسته به میانگین بازشدگی شبکه اشباع کارستی^{۲۱} می‌باشد می‌تواند به عنوان شاخص کارستی شدن در نظر گرفت و سیستم های کارستی مختلف را مقایسه کرد.

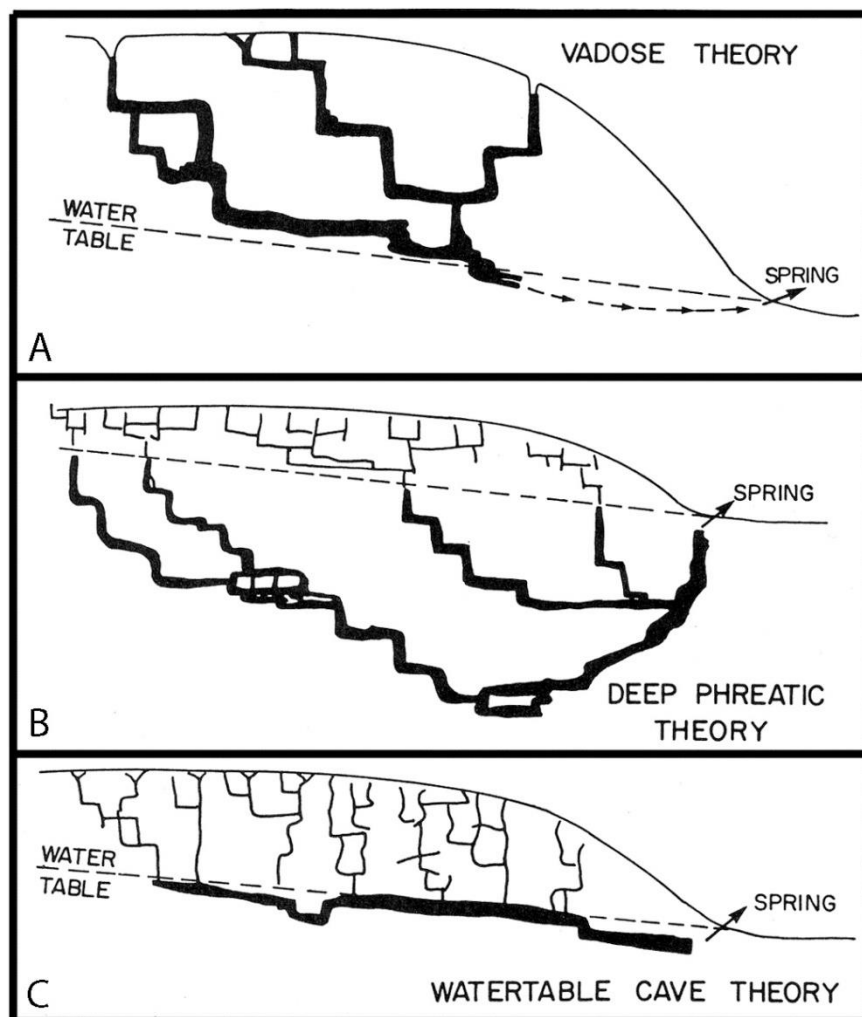
تئوری‌های موجود در زمینه چگونگی توسعه مجاری بزرگ و غار مانند آبخوان‌های کارستی به سه صورت می‌باشد (Flora and Vacher, 2011; Ford, 2003). ۱) تئوری توسعه در زون غیراشباع (Vadose Theory) ۲) تئوری توسعه مناطق عمیق اشباع (Deep Phreatic theory) و ۳) تئوری توسعه در زون سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی (Watertable Cave Theory) شکل (۲-۱۳). در تئوری توسعه کارست در زون غیر اشباع اعتقاد بر این است که بیشتر توسعه مجاری بزرگ و غار مانند در زون غیراشباع آبخوان صورت می‌گیرد. در تئوری توسعه کارست در زون عمیق محیط‌های اشباع، مجاری بزرگ و غار مانند در زیر سطح ایستابی و محیط‌های اشباع آبخوان صورت می‌گیرد و در تئوری توسعه در زون سطح ایستابی، مجاری بزرگ و غار مانند آبخوان در اثر نوسانات سالانه تراز آب زیرزمینی در نزدیک سطح تراز ایستابی تشکیل می‌شوند.

۹-۲- ارتباط کارست شدگی سطحی و عمقی

ناصری و همکاران (۱۳۸۷) با تلفیق روش‌های استفاده از عوارض سطحی هیدروژئولوژی کارست و اکتشافات ژئوالکتریک با حفاری‌های اکتشافی در تاقدیس آسماری (جنوب شرق مسجد سلیمان) به بررسی ارتباط توسعه کارست سطحی و عمقی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان از عدم همبستگی بین نمایانگرهای سطحی و کارست شدگی عمقی در تاقدیس مذکور می‌دهد. بر اساس شواهد سطحی

²¹ Average void aperture of submerged karstic network

تکامل کارست سطحی به صورت ناقص (درجه مروکارست) و تکامل کارست عمقی به صورت پیشرفته (درجه هولوکارست) می‌باشد.



شکل ۲-۱۳- دیاگرام تئوری‌های رایج تشکیل غار و مجاری بزرگ زیرزمینی (Flora and Vacher, 2011; Ford, 20)

با توجه به مطالعه بالا به طور طبیعی توسعه درونی کارست‌ها به دلیل سرعت کم جریان‌های زیرزمینی باید بیشتر از توسعه سطحی باشد اما لازم به ذکر است که واژه هولوکارست توسط سی وی جیک (Civijic, 1904) جهت توسعه مناطق سطحی کارست ارائه شده است. ایشان نواحی کارستی را

بر اساس عوارض و اشکال سطحی کارست از قبیل وجود فروچاله ها، دره‌های خشک و ... به سه دسته مروکارست (کارست‌شدگی ضعیف)، مزوکارست (متوسط) و هولوکارست (کارست‌شدگی پیشرفته) تقسیم کرده است. بنابراین به کار بردن واژه هولوکارست برای توضیح مقدار کارست‌شدگی درونی آبخوان‌های کارستی از سوی ناصری و همکاران (۱۳۸۷) اشتباه است.

لازم به ذکر است مطالعات جدیدی، مدل سازی سرعت پیشرفت توسعه کارست را بررسی کرده‌اند. دربرودت و گابرووسک (Dreybrodt and Gabrovsek, 2010) با استفاده از مدل سازی، سیر تکامل کارست‌شدگی و سرعت فرآیند پیشرفت آن را بررسی کرده‌اند. آن‌ها در این شبیه سازی از اختلاط جریان-های سطحی با فشار جزئی دی اکسید کربن $0/05 \text{ atm}$ و جریان‌های زیرزمینی با فشار جزئی دی اکسید کربن $0/001 \text{ atm}$ استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان دهنده تشکیل حفره‌ای کانال مانند به عمق ۱۰۰ متر در یکصد هزار سال صورت می‌گیرد.

فصل سوم

روش انجام کار

در این فصل روش‌های انجام مطالعات صورت گرفته در حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان بیان می‌شود. در ادامه چگونگی برآورد مساحت حوضه آبرگیر چشمه، تعیین حجم ذخیره دینامیک آبخوان به روش‌های مایلت و مانجین و همچنین توضیحات لازم در مورد استفاده از سنجش از دور و GIS ارائه می‌شود.

مهم‌ترین مراحل انجام کار در این مطالعه عبارتند از:

- ✓ تهیه و مطالعه نتایج پژوهش‌های انجام شده در منطقه مورد مطالعه
- ✓ تهیه نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دامغان و کیاسر از سازمان زمین شناسی کشور
- ✓ تهیه نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه از سازمان نقشه برداری کشور
- ✓ تهیه عکس‌های ماهواره‌ای مورد نیاز منطقه مورد مطالعه از سازمان فضایی کشور (باند پنکروماتیک ماهواره IRS با قدرت تفکیک مکانی ۵/۶ متر، 71-45-A pan، هشتم آگوست ۲۰۰۷) و تصاویر ماهواره لندست (TM) با قدرت تفکیک مکانی ۲۸/۵ متر تصویر برداری شده در تاریخ سی‌ام جولای ۲۰۰۱
- ✓ تهیه اطلاعات بارندگی، دما و تبخیر ایستگاه‌های باران‌سنجی شمال استان سمنان از امور آب شهرستان دامغان
- ✓ اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه، در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰

- ✓ تهیه بسته‌های نرم‌افزاری مورد نیاز از قبیل 3 ILWIS، Arc GIS 9.3، Global Mapper 11، Tectonic FP و RockWork14، Aqqa، AquaChem3، Google-Earth، ENVI4
- ✓ تعیین عوامل موثر در توسعه کارست و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزارهای Arc GIS 9.3 و ILWIS 3
- ✓ تهیه نمودارهای گل‌سرخ خطواره‌ها و گسل‌های منطقه با نرم‌افزارهای Tectonic FP و RockWork14
- ✓ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده

۳-۱- مطالعات زمین‌شناسی

پس از تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی دامغان و کیاسر، بررسی‌های اولیه بر روی آنها صورت گرفت. دو نقشه مذکور در محیط نرم افزار Global Mapper 11 زمین مرجع و موزاییک شدند. سپس در محیط نرم‌افزار Arc GIS 9.3 اقدام به تهیه لایه زمین‌شناسی شد. ولی با توجه به اینکه دو نقشه مذکور تطابق مناسبی با همدیگر نداشتند جهت اصلاح نقشه تهیه شده از Google Earth و ترکیب رنگی کاذب باندهای ۷، ۴، ۲ تصاویر ماهواره لندست استفاده شد و نقشه زمین‌شناسی اصلاح شده اولیه تهیه گردید. در مطالعات صحرایی، بررسی برونزدها و اندازه‌گیری‌ها به منظور شناسایی جنس و سن سنگ‌ها، ساختار واحدهای سنگی و شناخت سیستم‌های شکستگی صورت گرفته است. با شناسایی واحدهای سنگی، نقشه زمین‌شناسی تهیه شده نیز بررسی و در صورت نیاز اصلاحات لازم صورت گرفت و نقشه نهایی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. برای مطالعه صحرایی مراحل زیر انجام شده است.

- طراحی مسیر پیمایش: قبل از شروع عملیات صحرایی و بعد از بازدیدهای مقدماتی، مسیرهای پیمایش بر روی نقشه زمین‌شناسی و Google Earth مشخص گردید. این مسیرها ویژگی‌های زیر را دارا بودند. در صورت امکان تمام سازندهای موجود مشاهده شوند، ساختارها و گسل‌های اصلی منطقه مشاهده گردد و مسیر پیمایش صعب‌العبور نباشد.

- تهیه وسائل مورد نیاز از قبیل سیستم موقعیت یاب جغرافیایی (GPS)، دوربین عکاسی، چکش، کمپاس، متر و کولیس
- مطالعات میدانی: پس از انجام مراحل فوق، اندازه گیری های صحرائی و بررسی های ساختاری در قالب ایستگاه های انتخابی، بررسی گردید. موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه با استفاده از GPS ثبت شده و ویژگی های ساختاری از قبیل تعداد، فاصله شکستگی ها از هم، مقدار بازشدگی، وجود پرشدگی، جنس رسوبات پرکننده و شیب و امتداد شکستگی ها اندازه گیری شد. این اندازه گیری ها در مورد تمامی شکستگی های موجود در هر ایستگاه صورت گرفته است و در مواردی به دلیل صعب العبور بودن منطقه، فاصله و طول شکستگی ها تخمین زده شده است. مقدار بازشدگی شکستگی ها که یکی از پارامترهای مهم در توسعه کارست می باشد با استفاده از کولیس با دقت بالایی (در حد میلی متر) اندازه گیری شده است. جهت سهولت کار و افزایش دقت جدولی همانند جدول ۳-۱ تهیه و استفاده شده است.

جدول ۳-۱- نمونه ای از جدول های مورد استفاده در برداشت های صحرائی

مکان: چشمه علی												تاریخ برداشت: ۱۳۹۰/۲/۱۸		شماره برگه: ۳	
ردیف	ایستگاه	مختصات جغرافیایی ایستگاه		مشخصات شکستگی		پوششگی	بازشدگی (میلی متر)	طول (متر)	نوع شکستگی	سنگ زمینه	فاصله بین درزه ها (cm)	مساحت (متر مربع)	توضیحات		
		X	Y	جهت شیب	امتداد										
۷	۴	۵۴°۰۳'۱۳"	۳۶°۱۷'۰۳"	SE	N20E	رس	۲۲۰	۱۵	درزه	دلیچای	۲۰	۲۰			
۸	۵	"	"	SE	N60E	-	۶	۸	لایه	لار	۹۰				
۹	۶														

- تهیه مقطع زمین شناسی: با استفاده از نقشه های زمین شناسی، توپوگرافی و بررسی های صورت گرفته شیب و امتداد لایه بندی منطقه مورد مطالعه مقطع زمین شناسی به روش دستی ترسیم گردید. انتخاب مسیر مقطع به گونه ای بوده است که ساختارهای اصلی همچون تاقدیس و ناودیس و روند لایه بندی را به خوبی نشان دهد.

۳-۲- مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی

مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌علی دامغان در سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ به وسیله کرمی (۱۳۸۳) صورت گرفته است. در مطالعه حاضر جهت ارزیابی مجدد رفتار چشمه در شش مرحله پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه اندازه‌گیری شده است. برخی از این مطالعات در محل چشمه و برخی دیگر در آزمایشگاه صورت گرفته است. فعالیت‌های انجام شده در این زمینه در زیر آمده است.

۳-۲-۱- نمونه برداری از آب چشمه

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب چشمه، پارامترهای دبی، pH، درجه حرارت و هدایت الکتریکی در محل و یونهای کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، کلر، سولفات و نیترات با نمونه برداری و انتقال به آزمایشگاه اندازه‌گیری شده‌اند. در نمونه برداری از آب چشمه مواردی از قبیل نحوه برداشت نمونه، روش نگهداری و انتقال، فاصله زمانی بین نمونه برداری‌ها تا انجام آزمایش مورد توجه قرار گرفته است. برای نمونه برداری از آب چشمه‌علی دامغان از بطری‌های پلاستیکی مخصوص نمونه برداری با حجم ۲۵۰ میلی لیتر استفاده شده است. هنگام نمونه برداری ظرف نمونه برداری و درپوش آن با آب چشمه به صورت کامل شستشو داده شده و ظرف به آرامی و بدون ایجاد حباب در آن پر شده است. تمام نمونه گیری‌های انجام شده در محل خروجی اصلی چشمه صورت گرفته است (شکل ۱-۳). نمونه آب برداشت شده حداکثر تا ۴۸ ساعت پس از نمونه‌گیری به آزمایشگاه پارک علم و فناوری شهرستان شاهرود انتقال داده شده است.

۳-۲-۲- پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل نمونه برداری

پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل نمونه‌برداری شامل اندازه‌گیری دبی، هدایت الکتریکی، دما و pH می باشد که در زیر مختصری در مورد آن‌ها آورده شده است.

الف - اندازه‌گیری آبدهی چشمه

یکی از پارامترهای مهم و اساسی مطالعات آب‌های سطحی و زیرزمینی اندازه‌گیری دبی می‌باشد. منظور از دبی حجمی از آب است که در واحد زمان از سطح مقطع عمود بر جریان عبور می‌کند. در تحقیق حاضر جهت تعیین دبی از روش سرعت-سطح مقطع استفاده شده که سرعت با استفاده از دستگاه سرعت سنج (مولینه) اندازه‌گیری شده است. در زیر چگونگی اندازه‌گیری دبی توضیح داده شده است.

علاوه بر خروجی اصلی چشمه‌علی (شکل ۱-۳)، از جوانب مظهر چشمه و زیر دریاچه‌ی آن نیز، خروج آب صورت می‌گیرد. لذا جهت اندازه‌گیری دبی کلی چشمه، از کانالی که در برگزیده تمام خروجی‌های چشمه می‌باشد استفاده شده است (شکل ۲-۳). ابتدا طول مقطع عرضی کانال را اندازه‌گیری کرده و سپس میزان عمق آب در فاصله‌های یک متری از هم، اندازه‌گیری شده است. دستگاهی که جهت تعیین میانگین سرعت عبوری آب استفاده شده است از نوع آوات، ساخت شرکت آذر آشنا می‌باشد. جهت تعیین سرعت متوسط جریان، تعداد دور چرخش پروانه در واحد زمان در $\frac{1}{6}$ عمق سطح آب (عمقی که متوسط سرعت عبوری آب می‌باشد) اندازه‌گیری صورت گرفته است. سپس با استفاده از رابطه‌ای که برای این دستگاه طراحی شده است سرعت متوسط جریان عبوری تعیین شده است (رابطه‌های ۱-۳ و ۲-۳).

$$V = 0.24121.N + 0.0115414 \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

$$0.383469 \langle N \rangle 10.848$$

$$V = 0.276.N - 0.365871 \quad \text{رابطه (۲-۳)}$$

$$10.8481 \langle N \rangle 11.893$$

در رابطه (۱-۳) و (۲-۳)، N تعداد دور گردش در واحد زمان و V سرعت جریان آب عبوری از عرض کانال می‌باشد. در نهایت با استفاده از رابطه (۳-۳) مقدار دبی چشمه در هر اندازه‌گیری محاسبه شده است.

$$Q = A.V \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

در رابطه (۳-۳)، Q آبدهی چشمه بر حسب متر مکعب در ثانیه، V سرعت متوسط جریان بر حسب متر در ثانیه و A مساحت سطح مقطع عمود بر جریان بر حسب مترمربع می‌باشد.



شکل ۲-۳ محل اندازه‌گیری آبدهی چشمه



شکل ۱-۳ خروجی اصلی چشمه و محل نمونه‌گیری

ب- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC)

هدایت الکتریکی آب یکی از مهمترین پارامترهای شیمیایی آب می‌باشد و با کل املاح جامد حل شده در آب ارتباط دارد. برای اندازه‌گیری این پارامتر در محل خروجی اصلی چشمه از دستگاه هدایت سنج (Conductivity-meter) شرکت HACH مدل 50150 که دقت آن ۱ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد، استفاده شده است. لازم به ذکر است اندازه‌گیری‌های انجام شده هدایت الکتریکی در سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ نیز با این دستگاه انجام شده است (کرمی، ۱۳۸۳).

ج- اندازه‌گیری درجه حرارت

درجه حرارت آب‌های زیرزمینی جهت تعیین نوع جریان در سفره‌های کارستی بسیار حائز اهمیت است. برای اندازه‌گیری درجه حرارت آب در این مطالعه از دماسنج مربوط به دستگاه اندازه‌گیری هدایت‌سنج که دقت آن ۰/۱ درجه سانتیگراد می‌باشد، استفاده شده است.

د- اندازه‌گیری pH آب

pH یکی از پارامترهای شیمیایی مهم آب زیرزمینی می‌باشد. pH به عواملی از قبیل مقدار دی اکسیدکربن محلول در آب، مقدار آنیون‌های بی‌کربنات و کربنات و همچنین درجه حرارت وابسته است. هرچه مقدار دی اکسیدکربن محلول در آب افزایش یابد، مقدار pH کم می‌شود. همچنین مقدار pH در تجزیه و تحلیل داده-

ها و محاسبه اندیس شاخص اشباع کلسیت و دولومیت حائز اهمیت است. به همین دلیل این پارامتر در محل اندازه‌گیری شده است. دستگاهی که جهت اندازه‌گیری این پارامتر استفاده شده است دستگاه pH متر سانتکس (Suntex) مدل SP-701 ساخت تایوان بوده است.

س - محاسبه فشار گاز دی اکسیدکربن (PCO_2)

فشار گاز دی اکسیدکربن محلول در آب با استفاده از نرم افزار Phreeqc محاسبه شده است. جهت محاسبه فشار گاز دی اکسیدکربن محلول از رابطه (۳-۴) استفاده شده است. در این رابطه $a_{CO_2(aq)}$ اکتیویته دی - اکسیدکربن در حالت محلول می‌باشد که با توجه به نتایج پارامترهای شیمیایی و محاسبات نرم افزاری محاسبه گردیده است. ضریب موجود در رابطه ارائه شده، ثابت قانون هانری (Henry's Law) برای گاز دی - اکسیدکربن است. فشار جزئی این گاز برحسب اتمسفر (atm) بیان می‌گردد.

$$P_{CO_2} = 10^{-1.468} a_{CO_2(aq)} \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

۳-۲-۳ - پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

نمونه‌های برداشت شده از چشمه، جهت اندازه‌گیری آنیون‌ها و کاتیون‌ها اصلی به آزمایشگاه پارک علم و فناوری شهرستان شاهرود منتقل گردید. در آزمایشگاه کاتیون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم و آنیون‌های سولفات، نترات و بی‌کربنات اندازه‌گیری شده است. با استفاده از نتایج حاصله درصد خطای آزمایش، درصد سدیم، سختی کل، قلیائیت و کل محلول جامد محاسبه شده است.

۳-۳ - تعیین حوضه آبرگیر چشمه

تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی از جمله دشوارترین بخش‌های مطالعات هیدروژئولوژیکی کارست است (Bonacci and Zivaljevic, 1993). جهت برآورد مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی

لازم است به مجموعه‌ای از شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه دقت شود. کریمی و همکاران (Karimi et al. 2006) و کریمی (Karimi, 2003) ویژگی‌ها و شرایط لازم برای تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی را اینگونه بیان نموده‌اند (۱) حوضه آبرگیر چشمه در نزدیک‌ترین فاصله از موقعیت چشمه قرار می‌گیرد (۲) ارتفاع حوضه آبرگیر باید بیشتر از تراز ارتفاعی چشمه باشد (۳) هیچ مرز نفوذناپذیری حوضه آبرگیر را قطع نکند (۴) ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و وضعیت تکتونیکی منطقه باید توجیه کننده مساحت تخمینی حوضه آبرگیر چشمه باشد (۵) پارامترهای فیزیکوشیمیایی چشمه با وضعیت لیتولوژی آبخوان کارستی همخوانی داشته باشد (۶) بیلان آب زیرزمینی با مساحت کلی حوضه آبرگیر تطابق داشته باشد. در مطالعه حاضر جهت برآورد مساحت حوضه آبرگیر چشمه ابتدا با مشاهدات صحرایی سازندهای تراوا و ناتراوا، جهت شیب لایه‌ها و وضعیت تکتونیکی منطقه بررسی گردید. سپس با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، وضعیت ژئومورفولوژی و خطوط تقسیم آب‌های سطحی مساحت اولیه حوضه آبرگیر برآورد شد. جهت تعیین دقیق مساحت حوضه آبرگیر چشمه از بیلان هیدروژئولوژیکی و معادله ارائه شده توسط کریمی و همکاران (Karimi et al, 2005) و اشجاری و رئیسی (Ashjari and Raeisi, 2006) (رابطه ۳-۵) مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌علی برآورد شد.

$$A = \frac{V \pm \Delta S}{P * I * 10^3} \quad \text{رابطه (۳-۵)}$$

در این رابطه A مساحت حوضه آبرگیر چشمه (km^2)، V مقدار تخلیه سالانه چشمه طی یک سال آبی (m^3/y)، P مقدار بارندگی سالانه (mm/y) و I ضریب تغذیه (بدون بعد) که مابین ۰ تا ۱ می‌باشد. پارامتر ΔS در معادله بالا میزان حجم آزاد شده یا ذخیره شده از آبخوان در طول یکسال آبی است. سپس وضعیت حوضه آبرگیر چشمه با استفاده از مرزهای حوضه آبرگیر مشخص گردید.

۳-۴- تعیین حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه‌های کارستی (روش Maillet)

ساده‌ترین حالت منحنی فرود چشمه، منحنی فرود با یک رژیم جریان می‌باشد. یعنی چشمه‌های که منحنی فرود آن‌ها دارای یک شیب می‌باشد. در این صورت حجم ذخیره دینامیک سفره توسط رابطه (۳-۶) محاسبه می‌گردد (Milanovic, 1981)

$$V = 86400 \frac{Q_{t0}}{\alpha} \quad \text{رابطه (۳-۶)}$$

در صورتی که منحنی فرود چشمه دارای چندین ضریب فرود با شیب‌های متفاوت باشد در آن صورت حجم ذخیره دینامیک از رابطه (۳-۷) محاسبه می‌گردد.

$$V = 86400 \left(\frac{Q_{01}}{\alpha_1} + \frac{Q_{02}}{\alpha_2} + \frac{Q_{03}}{\alpha_3} \dots \right) \quad \text{رابطه (۳-۷)}$$

۳-۵- تعیین حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه‌های کارستی (روش Mangin)

قبلا ذکر شد که مانجین (Mangin, 1975) منحنی فرود چشمه‌های کارستی را متشکل از جریان سریع و جریان پایه می‌دانست. تعیین حجم ذخیره دینامیک جریان پایه و سریع به ترتیب از انتگرال‌گیری روابط (۲-۱۳) و (۲-۱۴) محاسبه می‌شود. بنابراین حجم ذخیره دینامیک جریان پایه در زمان $t=0$ از رابطه (۳-۸) محاسبه می‌شود.

$$V_0^b = \int_0^{\infty} q_0^b \exp(-\alpha t) dt = q_0^b / \alpha \quad \text{رابطه (۳-۸)}$$

حجم ذخیره دینامیک جریان پایه در زمان $t > 0$ از رابطه (۳-۹) محاسبه می‌شود.

$$V_t^b = \int_0^t q_0^b \exp(-\alpha t) dt = \left(q_0^b / \alpha \right) (1 - \exp(-\alpha t)) \quad \text{رابطه (۳-۹)}$$

حجم ذخیره دینامیک جریان سریع در زمان $t=0$ از رابطه (۱۰-۳) محاسبه می‌شود.

$$V_0^* = \int_0^t q_0^* (1 - \mu t) / (1 + \varepsilon t) dt = (q_0^* / \varepsilon) \left[\left(\ln(1 + \varepsilon t) (1 + \mu / \varepsilon) \right) - 1 \right] \quad \text{رابطه (۱۰-۳)}$$

و همچنین حجم ذخیره دینامیک در زمان $t > 0$ از رابطه (۱۱-۳) محاسبه می‌گردد.

$$V_t^* = \int_0^t q_0^* (1 - \mu t) / (1 + \varepsilon t) dt = (q_0^* / \varepsilon) \left[\left(\ln(1 + \varepsilon t) (1 + \mu / \varepsilon) \right) - 1 - \mu t \right] \quad \text{رابطه (۱۱-۳)}$$

۳-۶- استفاده از روش سنجش از دور و GIS

جهت بررسی توسعه کارست با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور لازم است مختصری با این روش‌ها آشنا شده و در مورد کاربرد آن‌ها در این مطالعه توضیح داده شود.

۳-۶-۱- سنجش از دور

سنجش از دور، علم مشاهده، درک و ثبت اشیاء و وقایع از راه دور گویند (Weng, 2010). زبیری و مجد (۱۳۷۸) سنجش از دور را علم هنر و کسب اطلاعات در مورد اجسام، اراضی یا پدیده‌های مختلف بدون تماس با آن‌ها بیان کرده‌اند. شناسایی این پدیده‌ها توسط سنجنده صورت می‌گیرد. هر وسیله‌ای که امواج الکترومغناطیس منعکس شده از پدیده‌های مختلف یا سایر انرژی‌های ساطع شده را جمع‌آوری کرده و به شکل مناسب برای کسب اطلاعات از محیط اطراف ارائه دهد سنجنده یا Sensor گویند (زبیری و مجد، ۱۳۷۸). سنجنده‌ها بر اساس نوع ثبت اطلاعات به دو نوع سنجنده تصویری و سنجنده رقمی یا عددی تقسیم می‌شوند. سنجنده‌های تصویری، اطلاعات را به صورت عکس و تصویر درآورده و همانند دوربین‌های عکسبرداری معمولی نتایج را به صورت فیلم‌های مختلف (پانکروماتیک، مادون قرمز و ...) تهیه می‌نمایند.

سنجنده‌های رقمی اطلاعات ارسالی را به صورت اعداد و ارقامی که گویای میزان روشنایی قسمتی معین از جسم بازتاب کننده انرژی است ثبت می‌کنند. بنابراین نحوه تحلیل این دو نوع داده برای کسب آگاهی از پدیده‌ها با یکدیگر متفاوت می‌باشد. به همین دلیل دو نوع تفسیر، چشمی (Visual interpretation) و رقمی (Digital interpretation) جهت تفسیر این اطلاعات کاربرد دارد. در تفسیر رقمی، می‌توان اعداد و ارقام را طی مراحل خاصی به سیستم مختصات رنگی (RGB) برده و به تصویر و عکس تبدیل کرد تا برای چشم قابل درک گردد و بر روی صفحه رایانه به نمایش درآید. یکی از راه‌های علم دور سنجی استفاده از قدرت دید و بینایی انسان است که به این منظور لازم است انرژی نورانی از جسم به چشم وارد و مغز بتواند آن را تفسیر نماید. این نور یا از خود جسم ساطع می‌شود یا از منبع دیگر به جسم تابیده و بازتاب آن به چشم می‌رسد. مهمترین منبع انرژی جهت دورسنجی امواج الکترومغناطیس خورشید است. نور خورشید ترکیبی از امواج با طول موج‌های متفاوت است. هر شیء بنابر ویژگی‌های ساختاری و ملکولی در طول موج‌های خاصی بیشترین انعکاس را از خود نشان می‌دهد. چشم انسان فقط ناحیه طول موج مرئی را می‌تواند تشخیص و مشاهده نماید. سنجنده‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که سایر طول موج‌های انعکاسی اجسام را بتوانند به صورت اطلاعات رقمی در واحدهایی به نام پیکسل ذخیره نمایند. در واقع اطلاعات موجود در هر پیکسل، ارزشی از میزان بازتاب جسم در آن طول موج می‌باشد. میزان بازتاب انعکاسی هر پدیده به صورت رقمی بین ۰ تا ۲۵۵ ثبت می‌شود. مقدار صفر یعنی هیچ انعکاسی از جسم ثبت نشده و به صورت سیاه رنگ می‌باشد ولی مقدار ۲۵۵ نشان دهنده صددرصد بازتاب از جسم بوده و به صورت سفید رنگ نشان داده می‌شود. مابین این دو مقدار به صورت تن‌های مختلف خاکستری رنگ همراه با ارزش آن در پیکسل ثبت می‌شود. امواج الکترومغناطیسی دارای طول موج گسترده و پیوسته‌ای هستند که تقسیمات آن به ترتیب افزایش طول موج عبارتند از:

الف) اشعه گاما و اشعه ایکس

این دو موج بسیار کوتاه می‌باشند و توسط جو زمین به مقدار زیاد جذب می‌گردند و در کاربردهای دورسنجی استفاده‌ای ندارند.

ب) اشعه ماوراءبنفش

این قسمت از موج الکترومغناطیس دارای طول موج حدود $0.4 - 0.003$ میکرومتر می‌باشد. و بر حسب نزدیکی به نور مرئی به بخشهای ماوراءبنفش نزدیک (Near Ultraviolet)، ماوراءبنفش دور (Far Ultraviolet) و ماوراءبنفش خیلی دور (Extra Ultraviolet) تقسیم می‌گردد. فقط طول موجهای بزرگتر از 0.3 میکرومتر (ماوراءبنفش نزدیک) به زمین می‌رسند و در سنجش از دور استفاده می‌شوند.

ج) نور مرئی (Visible Light)

این محدوده از طیف در حد طول موجهای 0.4 تا 0.7 میکرون می‌باشد که چشم انسان قادر به رؤیت آن است. بیش از 50% انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد در این محدوده قرار دارد و به طور وسیعی در دورسنجی به کار گرفته می‌شود.

د) محدوده مادون قرمز (Infrared)

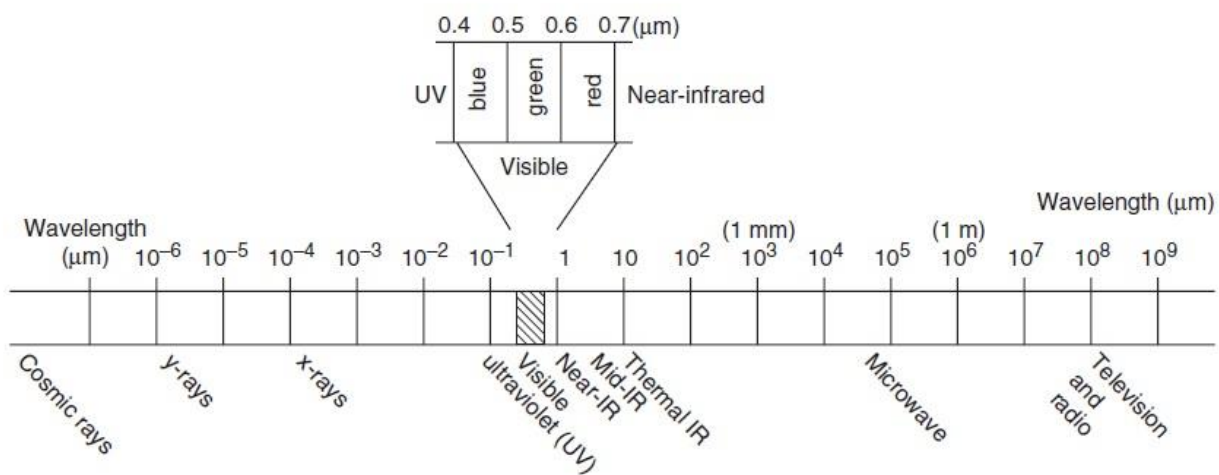
دامنه این طیف موجی از 0.7 میکرومتر تا 1 میلی‌متر است ولی در عمل طول موجهای 0.7 تا 14 میکرومتر در دورسنجی استفاده می‌شود. این محدوده را بر اساس نزدیکی به نور مرئی به سه گروه مادون قرمز نزدیک (Near Infrared)، مادون قرمز میانی (Middle Infrared) و مادون قرمز دور (Far Infrared) تقسیم می‌کنند. در تقسیم‌بندی دیگری که بیشتر در کارهای دورسنجی استفاده می‌شود به دو بخش مادون قرمز انعکاسی (Reflected Infrared) و مادون قرمز حرارتی (Thermal Infrared) تقسیم‌بندی می‌شود. حدود 40% انرژی خورشیدی که به زمین می‌رسد در این فاصله قرار دارد و از آن در تعیین حد فاصل آب و خشکی، مناطق هیدروترمال، ژئوترمال و ... استفاده می‌گردد.

ه) امواج مایکروویو (Microwave)

طول موج این ناحیه 1 میلی‌متر تا 1 متر است. این امواج در شرایط بد آب و هوایی نیز قادر به عبور از جو زمین هستند. میزان این امواج در طیف خورشیدی ناچیز است و به دلیل قدرت نفوذ زیاد به طور مصنوعی

در سکوهاى ماهواره‌اى (محلّى که سنجنده قرار مى‌گیرد) تولید و پراکنده شده و به امواج رادار نیز شناخته مى‌شوند. تقسیمات طیف امواج الکترومغناطیسی در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.

به منظور استفاده از اطلاعات و تصاویر تهیه شده لازم است عملیات تصحیح و پردازش بر روی آن‌ها صورت گیرد که بخشی از این عملیات‌ها توسط مراکز گیرنده انجام مى‌شود. در ادامه بعضی از روش‌های مورد استفاده از این اطلاعات و تصاویر از جمله ترکیب رنگی، نسبت‌گیری باندی و فیلترگذاری توضیح داده مى‌شود.



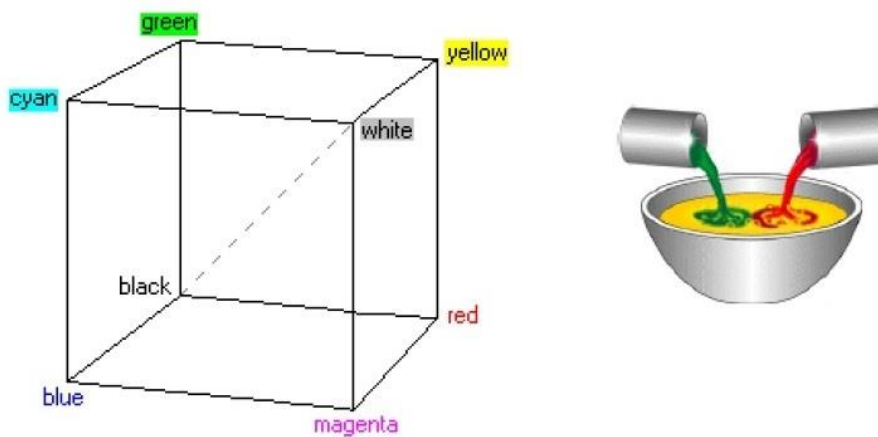
شکل ۳-۳- تقسیم بندی طیف امواج الکترومغناطیسی (Weng, 2010)

۳-۱-۱-۶- ترکیب رنگ (Color Composite)

همانگونه که بیان شد تصاویر برداشت شده، مقدار شدت نور انعکاسی است که به صورت رنگ سیاه تا سفید بوده و تغییرات به صورت درجات مختلف خاکستری نمایان می‌شود. برای اینکه تصاویر به صورت رنگی برای کاربر قابل مشاهده باشد لازم است باندهای مختلف را در یک سیستم رنگی مناسب با همدیگر ترکیب کنند. یکی از سیستم‌های رنگی مورد استفاده سیستم رنگ RGB است. شکل ۳-۴ مفهوم سیستم رنگی RGB را نشان می‌دهد. سه رنگ اصلی هر تصویر رنگی قرمز، سبز و آبی می‌باشند که با ترکیب آن‌ها سایر رنگ‌ها تشکیل می‌شود. لذا چنانچه باندهای طیفی به این سه رنگ نمایش داده شود و با هم ترکیب شوند، تصویری

با رنگ‌های کاذب از منطقه به نمایش در می‌آید که پردازش آن برای کاربر آسان‌تر می‌باشد. با توجه به حالت‌های مختلف ترکیب طیف‌های باندهای انواع مختلف ترکیب باندهای وجود دارد. با توجه به اینکه گیاهان در باند ۴ ماهواره لندست انعکاس زیادی دارند چنانچه این باند را در ترکیب، به جای رنگ سبز قرار دهیم پوشش گیاهی در تصویر تهیه شده به رنگ سبز و رنگ واقعی دیده می‌شود. ترکیب سه باند ۷، ۴، ۲ به ترتیب به عنوان رنگ‌های قرمز، سبز و آبی بهترین و واقعی‌ترین تصویر از پدیده‌های موجود را نمایش می‌دهد.

Color cubic



شکل ۳-۴- مفهوم ترکیب رنگ در سیستم RGB (Canada Center for Remote Sensing)

۳-۶-۱-۲- نسبت‌گیری (Ratioing)

نسبت‌گیری یا تقسیم باندهای طیفی بر یکدیگر ارزش عددی مقادیر پیکسل‌های تصویر اولیه را تغییر و باعث می‌گردد در تصویر بدست آمده خصوصیتی که به عنوان هدف مطالعه مشخص می‌شوند به نحو بهتری نمایش داده شود. عملیاتی همچون جمع، تفریق، ضرب و تقسیم را می‌توان در رابطه با تصاویر و باندهای ماهواره‌ای انجام داد. این عملیات در مورد پیکسل‌های نظیر به نظیر صورت می‌گیرد. یکی از کاربردهای نسبت‌گیری بدست آوردن پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های موجود می‌باشد. جهت بدست آوردن اطلاعات پوشش گیاهی به روش دورسنجی از پاسخ و رفتار گیاهان نسبت به امواج الکترومغناطیس بهره

می‌برند. با توجه به اینکه گیاهان در باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ لندست) بالاترین انعکاس و در باند قرمز مرئی (باند ۳ لندست) بیشترین جذب را دارند محققین با نسبت گیری از این دو باند شاخص‌های پوشش گیاهی متنوعی را ارائه داده‌اند. دو شاخص مهم و پرکاربرد $NDVI$ و $SAVI$ می‌باشند. این شاخص‌ها تفاضل و تناسبی از دو باند مذکور می‌باشد که در رابطه ۳-۱۲ شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ نشان داده شده است.

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad \text{رابطه (۳-۱۲)}$$

شاخص $SAVI$ که در واقع بازتاب پوشش گیاهی و خاک است به صورت رابطه ۳-۱۳ محاسبه می‌گردد.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)(1 + L)} \quad \text{رابطه (۳-۱۳)}$$

در معادله بالا L فاکتور تصحیح خاک است. اگر این فاکتور برابر صفر باشد بدین معناست که پوشش گیاهی خیلی متراکم است و اگر برابر با یک باشد بدین معناست که پوشش گیاهی تراکم ناچیزی دارد. در مناطقی مثل زاگرس فاکتور L را برابر ۰/۵ در نظر می‌گیرند و بیانگر مناطقی است که هم بازتاب خاک و هم بازتاب پوشش گیاهی وجود دارد (دشتی برمکی، ۱۳۸۹).

۳-۶-۱-۳- فیلترگذاری

یکی از مراحل پردازش تصاویر رقومی فیلترگذاری می‌باشد. فیلتر کردن نوعی تغییر ارزش طیفی است که در آن ارزش هر پیکسل نسبت به پیکسل همسایه‌اش تغییر می‌کند و تصویر جدیدی می‌سازد که پدیده‌های مورد نظر تشدید می‌شوند. فیلترها ماتریسی از اعداد می‌باشند که در اندازه‌های 3×3 ، 5×5 ، 7×7 و ... تهیه و بر روی عکس مورد نظر اعمال می‌شود. فیلترهای جهتی (Directional filter) نوعی از فیلترها هستند که

²² Normalize Difference Vegetation Index

²³ Soil Adjusted Vegetation Index

پدیده‌های با جهت‌یابی عمودی، افقی و مورب را آشکار می‌سازند و برای بارزسازی پدیده‌های خطی همچون درزه‌ها، دایک‌ها، گسل‌ها و ... استفاده می‌شود. عملکرد فیلترها به گونه‌ای است که مقدار هر پیکسل در تصویر خروجی از ضرب کردن مقادیر تمام پیکسل‌های عکس ورودی و فیلتر، در وزن متناسب و حاصل جمع آن به دست می‌آید. فیلتر سوبل (Sobel) از فیلترهای جهتی مناسب برای شناسایی و بارزسازی خطواره‌های موجود در مناطق کارستی است. جدول ۳-۲ انواع مختلف فیلترهای جهتی موجود را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲- برخی از فیلترهای جهتی استفاده شده جهت استخراج شکستگی‌ها (خدری، ۱۳۹۰)

-۱	۰	۱	۱	۲	۱	-۱	-۲	-۱
-۲	۰	۲	۰	۰	۰	۲	۴	۲
-۱	۰	۱	-۱	-۲	-۱	-۱	-۲	-۱
SOBEL(N-S)			SOBEL(E-W)			E-W		
-۱	۲	-۱	۲	-۱	-۲	-۲	-۱	۲
-۲	۴	-۲	-۱	۴	-۱	-۱	۴	-۱
-۱	۲	-۱	-۲	-۱	۲	۲	-۱	-۲
N-S			NW-SE			NE-SW		
۱	۱	۱	۱	۲	۱	-۱	-۱	-۱
۱	-۸	۱	۲	-۱۲	۲	-۱	۱۶	-۱
۱	۱	۱	۱	۲	۱	-۱	-۱	-۱
LAPLACE			LAPLACE			Edge enhance		

۳-۶-۲- سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

سیستم اطلاعات جغرافیایی یک بسته نرم افزاری جامع با ابزارهای ورودی، ذخیره، بازیابی، همراه با فرآیندهای پردازشی و خروجی است که جهت بررسی داده‌های جغرافیایی طراحی شده است (Weng, 2010). مزیت سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام فرآیندهای پردازشی بر روی داده‌های موجود در موقعیت

مکانی خود و ارائه پاسخ به سوالات موجود درباره این منابع اطلاعاتی می‌باشد (Shamsi, 2005). توانایی GIS در تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی و فرآیند تصمیم‌گیری نقش اساسی را بازی می‌کند و به طور کلی می‌توان پشتیبان‌های برای تصمیم‌گیری‌ها استفاده کرد.

فصل چهارم

تحلیل داده‌های ساختاری و پردازش‌های دورسنجی

تحلیل ساختاری یک منطقه عموماً "مبتنی بر نتایج حاصل از برداشت‌های صحرایی یا آزمایشگاهی بر روی نقشه‌ها و تصاویر آن منطقه می‌باشد. استفاده هم‌زمان از نتایج این مطالعات می‌تواند ضریب اشتباهات را کاهش داده و تحلیل بهتری از ساختارهای یک منطقه ارائه نماید. در این فصل، با استفاده از دو روش تکنیک‌های سنجش از دور و GIS و تجزیه و تحلیل درزه و شکستگی‌های اندازه‌گیری شده در صحرا، توسعه سطحی کارست در حوضه آبخیز چشمه‌علی دامغان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و GIS و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز و ارزش‌دهی به هر عامل در هر لایه و سپس تلفیق لایه‌های تهیه شده با وزن‌های کارشناسی شده، مناطق با توسعه‌یافتگی متفاوت شناسایی شده‌اند. بنابراین سعی بر آن بوده که مراحل انجام کار به صورت مختصر و مفید شرح داده شود. در ادامه شاخص کارست-شدگی شکستگی‌های ایستگاه‌های برداشتی محاسبه و مورد بحث قرار گرفته است.

۴-۱- توسعه کارست در حوضه آبخیز چشمه‌علی با استفاده از GIS و RS

برای بررسی توسعه کارست در حوضه آبخیز چشمه‌علی دامغان لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز تهیه، وزن‌دهی و هم‌پوشانی شده‌اند. برای انجام این تحقیق ابتدا لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، بارش، دما، شیب، پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه‌ها، چگالی خطواره‌ها، چگالی گسل‌ها، فاصله از خطواره‌ها و فاصله از گسل‌ها با

استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه تهیه شده و با اعمال وزن‌دهی مناسب مدل توسعه کارست حوضه آبگیر چشمه‌علی تهیه شده است.

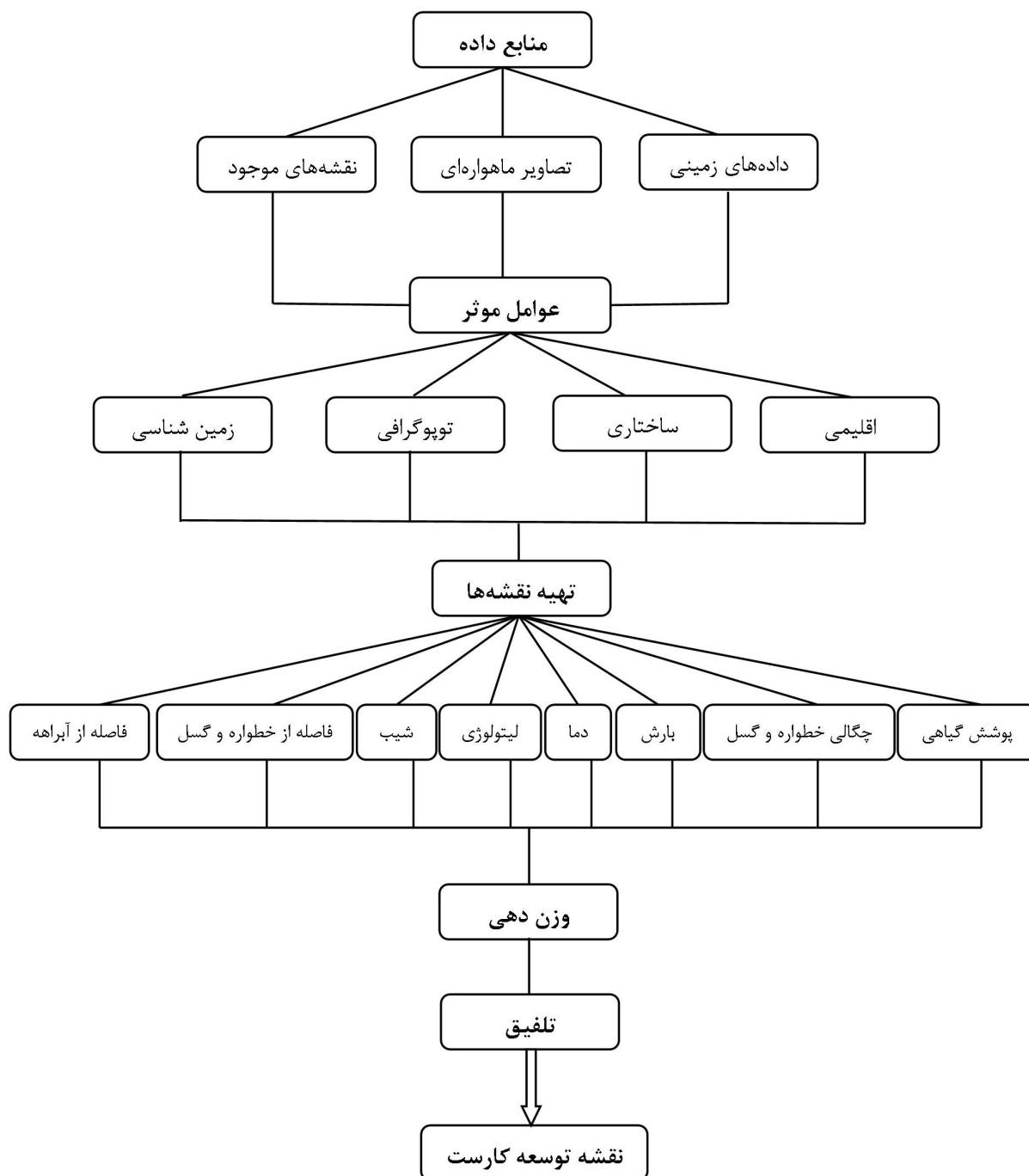
۴-۱-۱- آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی

شکل (۴-۱) مراحل تهیه نقشه توسعه کارست منطقه را نشان می‌دهد. در ادامه چگونگی ساخت هر لایه اطلاعاتی به صورت مختصر شرح داده می‌شود. لازم به توضیح است که در این مدل‌سازی تمام پارامترهای موثر بر توسعه کارست تهیه و با وزن‌های متناسب با همدیگر تلفیق شده‌اند در نتیجه نقشه نهایی، چگونگی پراکندگی توسعه کارست در منطقه را به نمایش می‌گذارد.

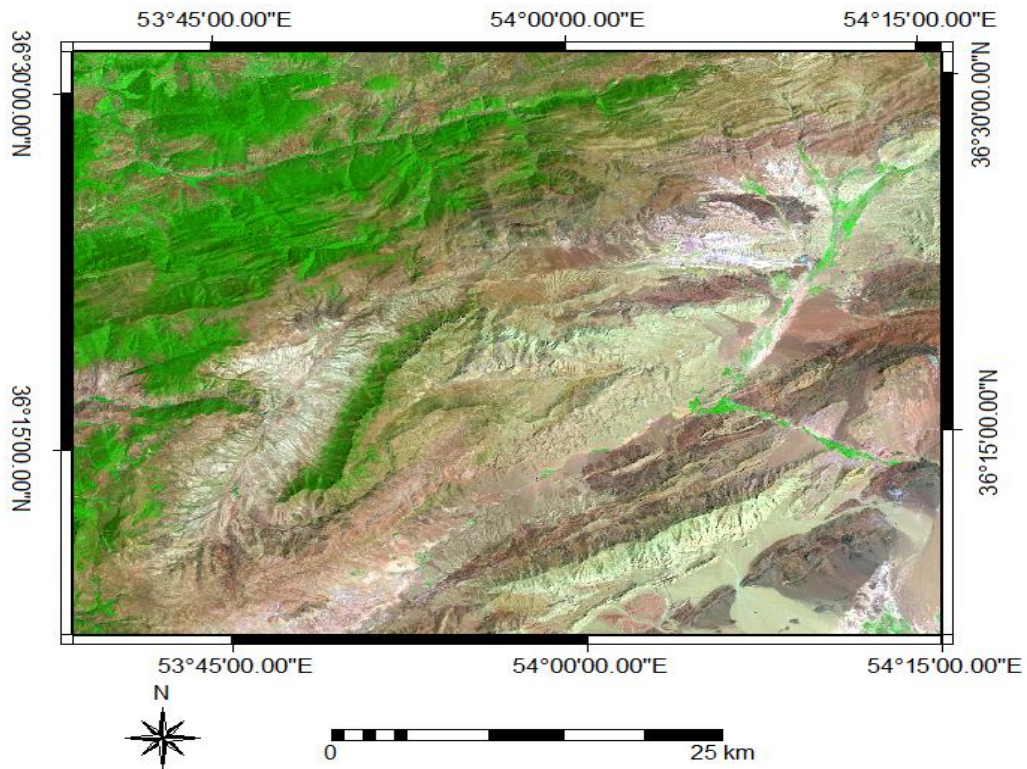
۴-۱-۱-۱- لایه لیتولوژی

لایه لیتولوژی حوضه آبگیر چشمه‌علی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دامغان و کیاسر در نرم افزار Arc GIS تهیه گردید. همانطور که در فصل اول ذکر شد حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان در دو زون مختلف و دو نقشه زمین‌شناسی دامغان و کیاسر قرار دارد. لذا جهت تهیه این لایه اطلاعاتی دو نقشه مذکور در نرم افزار Arc Map 9.3 زمین مرجع شدند، سپس سازندهای مختلف بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای شناسایی شدند. با رقومی کردن مرز سازندها، برای این نقشه‌ها یک Geo data base تهیه گردید. نقشه مذکور با تبدیل فرمت مناسب در Google Earth و همچنین تصویر ترکیب رنگ باندهای ۷، ۴، ۲ تصاویر ماهواره لندست بررسی و اصلاح گردید. شکل (۴-۲) تصویر ترکیب رنگ باندهای ۷، ۴، ۲ منطقه مورد مطالعه و نواحی شمالی آن را نشان می‌دهد. در ادامه با تبدیل فرمت‌های برداری به رستری که از توابع پردازشی Arc GIS می‌باشد نقشه لیتولوژی تهیه شده به یک لایه رستری تبدیل شد. سپس با استفاده از ابزار Spatial Analysis به هر سازند با توجه به اهمیتی که در پدیده کارستی شدن می‌تواند داشته باشد ارزش‌دهی مناسبی داده شد و در نهایت به لایه موجود وزنی متناسب با اهمیت آن در

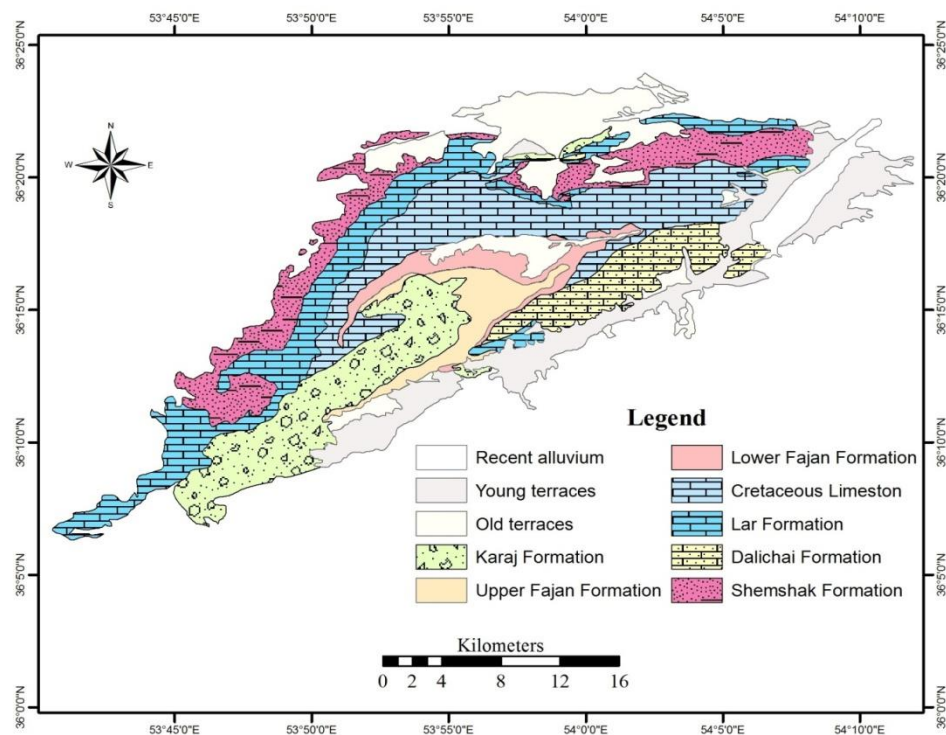
توسعه کارست اعمال شده و با سایر لایه‌ها تلفیق گردید. شکل (۴-۳) نقشه رستری لیتولوژی حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱ مراحل تهیه مدل توسعه کارست



شکل ۴-۲- تصویر ترکیب رنگی باند ۴، ۷ و ۲ ماهواره لندست



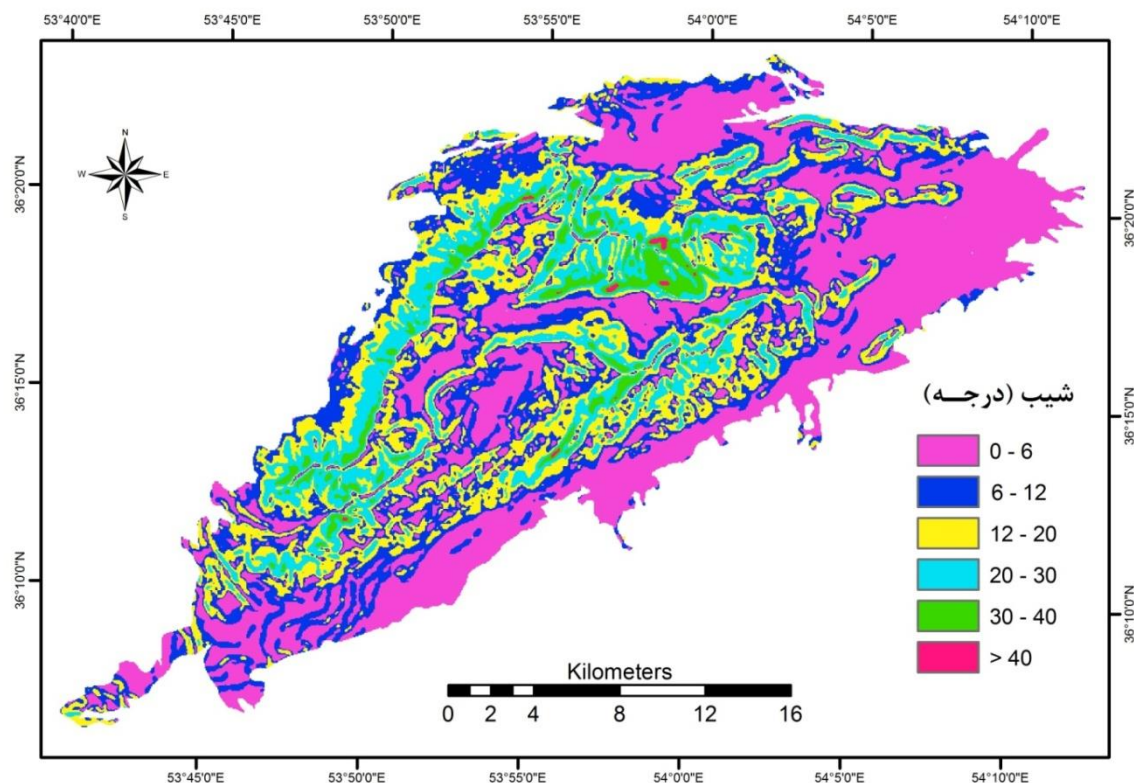
شکل ۴-۳- لایه لیتولوژی حوضه آبریز چشمه علی دامغان

۴-۱-۱-۲- لایه شیب

از جمله عوامل ژئومورفولوژیک موثر در توسعه کارست شیب توپوگرافی است. این لایه اطلاعاتی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی موجود و سپس تهیه مدل رقومی ارتفاع DEM منطقه تهیه شده است. نقشه تهیه شده با استفاده از توابع Reclassify که از مجموعه توابع Spatial Analysis در Arc GIS می‌باشد به شش کلاس طبقه‌بندی شد. با توجه به اینکه در شیب‌های کمتر فرصت و زمان ماندگاری آب و در نتیجه احتمال نفوذ، بیشتر می‌باشد به شیب‌های کمتر ارزش بیشتر و به شیب‌های زیادتر ارزش کمتری داده شد. درصد مساحت هر بازه شیب در جدول (۴-۱) آمده است. نقشه شیب منطقه مورد مطالعه در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. ارزش هر پیکسل در نقشه موجود مقدار شیب در آن موقعیت مکانی منطقه می‌باشد.

جدول ۴-۱- درصد مساحت بازه‌های شیب

بازه شیب	ارزش	درصد مساحت
۰°-۶°	۹	۳۶/۱
۶°-۱۲°	۸	۲۵/۴۱
۱۲°-۲۰°	۷	۲۱/۴
۲۰°-۳۰°	۶	۱۳/۶
۳۰°-۴۰°	۵	۳/۴۵
>۴۰°	۴	۰/۱۲۶



شکل ۴-۴- نقشه شیب در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان

۴-۱-۱-۳- لایه پوشش گیاهی

در فصل دوم در مورد اهمیت و تاثیر پوشش گیاهی در توسعه کارست توضیح داده شد. تهیه نقشه پوشش گیاهی مناطق وسیع به روش دستی کاری بسیار مشکل و زمان‌بر است. در مطالعه حاضر برای تهیه نقشه وضعیت پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره لندست (TM) تاریخ ۲۰۰۱/۰۷/۳۰ استفاده شده است. با استفاده از نسبت‌گیری دو باند ۳ و ۴ در نرم افزار ILWIS 3 پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه با شاخص‌های *NDVI* و *SAVI* تهیه گردید و نسبت به ترکیب رنگی باندهای ۷، ۴، ۲ منطقه (شکل ۴-۲) که بهترین دید منطقه را بدست می‌دهد، ارزیابی شدند. در نهایت با توجه به این ارزیابی و بازدیدهای صحرائی به عمل آمده (شکل ۴-۵ و ۴-۶) استفاده از شاخص پوشش گیاهی *NDVI* برای منطقه مورد مطالعه مناسب ارزیابی و مورد استفاده واقع گردید. شکل (۴-۷) نقشه پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل بیشترین تراکم پوشش گیاهی در قسمت‌های شمال غرب

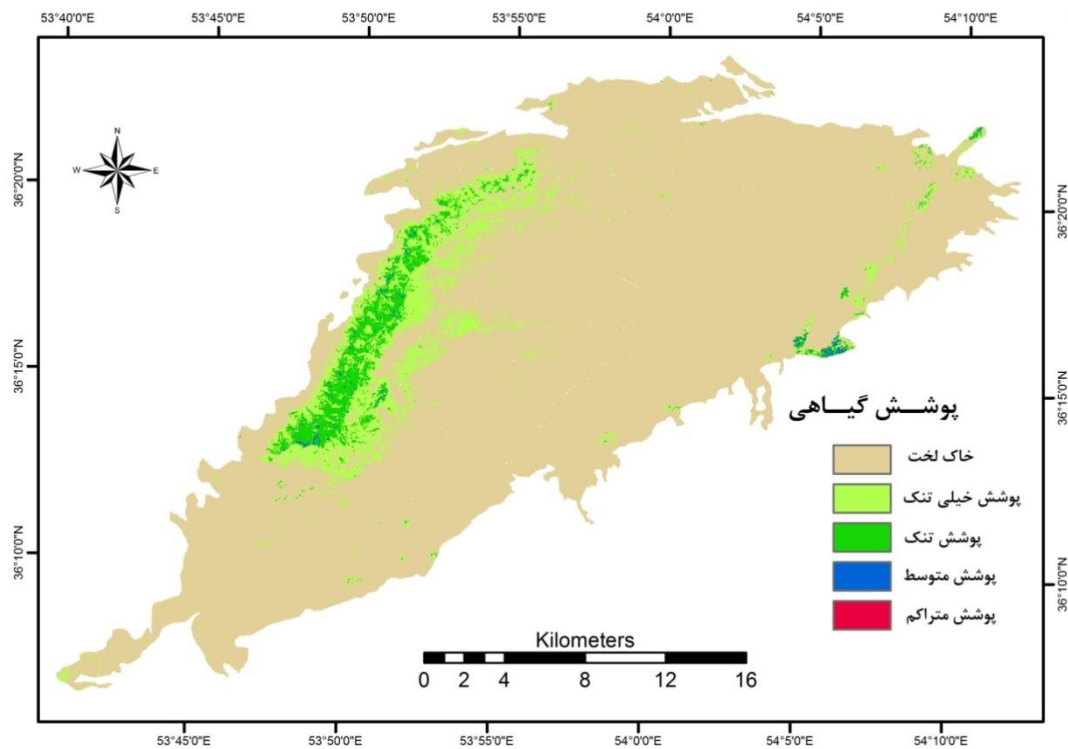
تاق‌دیس شمالی وجود دارد و بر اساس شاخص پوشش گیاهی *NDVI* بیشترین پوشش گیاهی در حد متوسط می‌باشد. لذا به مناطق با پوشش گیاهی بیشتر ارزش بیشتری داده شده است و برعکس.



شکل ۴-۶- پوشش تنک و خیلی تنک، دید جنوب



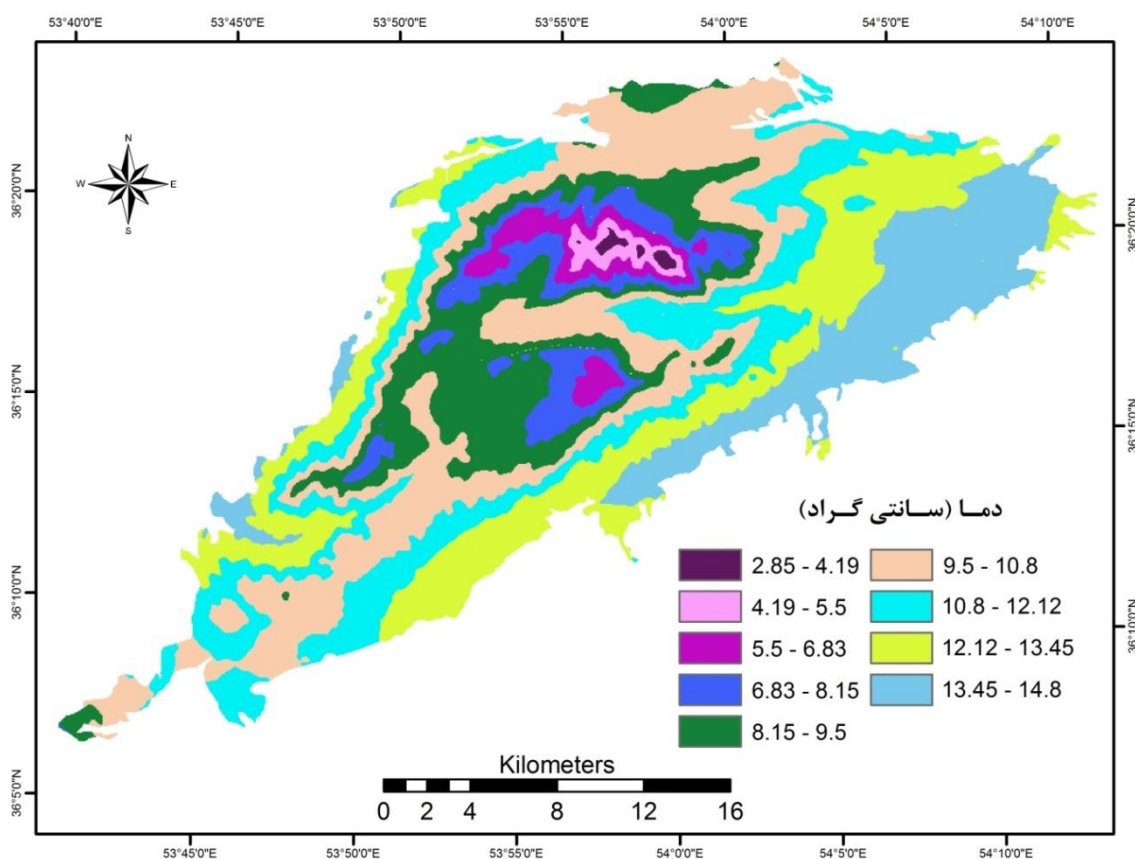
شکل ۴-۵- پوشش گیاهی تنک و متوسط، دید شرق



شکل ۴-۷- نقشه پوشش گیاهی در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان

۴-۱-۱-۴- لایه دما

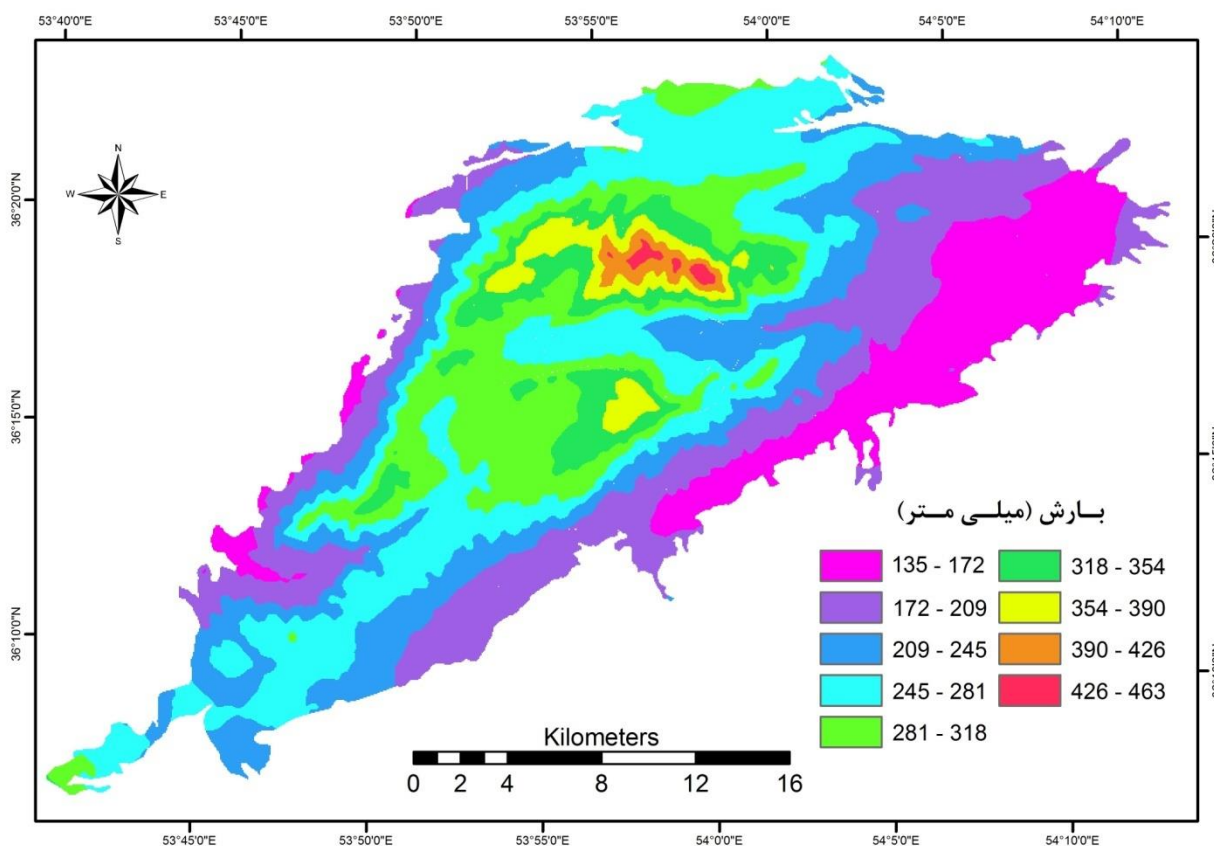
همان‌طور که قبلاً گفته شد دما یکی از عوامل اقلیمی مهم در توسعه کارست است. این لایه اطلاعاتی با استفاده از رابطه دما - ارتفاع بدست آمده در منطقه (شکل ۸-۱)، به روش درون‌یابی میانگین داده‌های ۲۰ ساله ایستگاه‌های باران و تبخیرسنجی شمال استان سمنان تهیه شده است. با فراخوانی مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) در محیط Raster Calculator از مجموعه ابزارهای Spatial Analysis در Arc GIS لایه اطلاعاتی دمای منطقه تهیه گردید. سپس با توجه به تاثیر معکوس دما در توسعه کارست (افزایش دما موجب کاهش انحلال گاز کربنیک در آب باران می‌گردد) به دماهای پایین ارزش بیشتر و به دماهای بالاتر ارزش کمتر داده شد. این لایه اطلاعاتی در شکل (۴-۸) نشان داده شده است.



شکل ۴-۸- نقشه لایه دما در حوضه آبریز چشمه علی دامغان

۴-۱-۱-۵- لایه بارش

لایه اطلاعاتی بارش با توجه به اهمیت بالایی که در توسعه کارست دارد همانند لایه اطلاعاتی دما با استفاده از رابطه بارندگی - ارتفاع منطقه، و بر اساس میانگین بارش داده‌های ۲۰ ساله ۱۴ ایستگاه باران سنجی موجود در شمال استان سمنان (شکل ۷-۱)، تهیه شده است. با فراخوانی مدل ارتفاعی منطقه (DEM) در محیط Raster Calculator لایه اطلاعاتی بارش منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. سپس این لایه اطلاعاتی در محیط Reclassify به نه کلاس طبقه بندی شد و با توجه به نقش مثبت بارش در توسعه کارست به مقادیر بیشتر ارزش بیشتری داده شد. شکل (۹-۴) نقشه هم باران منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

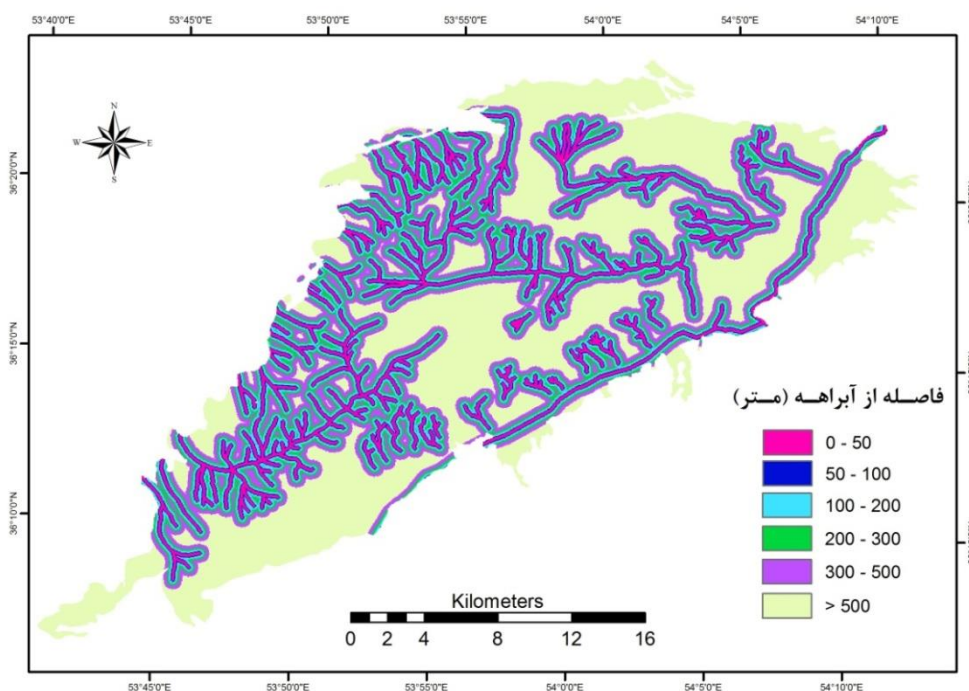


شکل ۹-۴- نقشه لایه هم بارش در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان

۴-۱-۱-۶- لایه فاصله از آبراهه‌ها

آبراهه‌ها معبر و مسیرهای از جریان‌های سطحی است که آب را از ارتفاعات به سمت مناطق پست‌تر هدایت می‌کنند. بعضی محققین با استفاده از نقشه آبراهه‌ها اقدام به تهیه نقشه تراکم آبراهه (Drainage Density) در واحد سطح نموده‌اند (Sener *et al.* 2005; Yeh *et al.* 2009). محققین دیگری از رده آبراهه‌ها استفاده کرده‌اند (Shaban *et al.* 2006). تشکیل آبراهه‌ها تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله لیتولوژی، توپوگرافی و اقلیم (مقدار و شدت ریزش‌های جوی) است. در صورتی که لیتولوژی و شرایط زمین نفوذناپذیر باشد جریان‌های سطحی می‌توانند جاری شده و تشکیل آبراهه بدهند. شعبان و همکاران (Shaban *et al.*, 2006) در کارهای خود آبراهه‌ها را محل‌های نفوذناپذیر عنوان کرده‌اند. لازم به توضیح است که باید دو عامل دیگر یعنی توپوگرافی و اقلیم را هم در نظر گرفت. در صورتی که شیب توپوگرافی زیاد باشد در جریان رواناب‌ها به مراکز دره‌ها و تجمع رواناب و تشکیل آبراهه‌ها کمک می‌نماید. هر چه مقدار و شدت بارش‌ها بیشتر باشد در ایجاد آبراهه‌ها موثرتر است. با بررسی‌های انجام شده لیتولوژی منطقه مورد مطالعه بیشتر از آهک‌های لار و کرتاسه تشکیل شده است که دارای نفوذ بالای می‌باشد و نمی‌توان محل آبراهه‌ها را به عنوان محل‌های نفوذناپذیر عنوان کرد. بنابراین عوامل توپوگرافی و اقلیم در تشکیل آبراهه‌ها در منطقه مورد مطالعه دخیل هستند. از آنجا که جریان‌های سطحی و مداوم در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد لذا تفاوتی مابین آبراهه رده پایین با آبراهه رده بالاتر از نظر مقدار حجم آب وجود ندارد (به عنوان مثال آبراهه رده ۱ در ایجاد جریان آب در آبراهه رده ۴ تاثیری ندارد چون در طی مسیر به آرامی نفوذ می‌کند) لذا استفاده از رده آبراهه‌ها در این منطقه مناسب تشخیص داده نمی‌شود. از آنجا که بیشتر محل آبراهه‌ها با محل دره‌ها تطابق دارد و لیتولوژی منطقه یکنواخت و نفوذپذیر است لذا می‌توان بیان کرد که برعکس گفته شعبان و همکاران (Shaban *et al.*, 2006) در منطقه چشمه‌علی آبراهه‌ها محل‌های تجمع بیشتر رواناب‌ها و نفوذ آب به درون زمین است. بنابراین می‌توان بیان کرد محل‌های عبور آبراهه‌ها نشان دهنده مکان‌های احتمال نفوذ بیشتر آب‌ها به داخل توده آبخوان و توسعه بیشتر کارست می‌باشد. با توجه به اینکه بیشتر حجم آب‌های سطحی از خط میانی آبراهه گذر می‌کنند و با افزایش فاصله به طرفین، از مقدار حجم جریان کاسته می‌شود لذا در

مطالعه حاضر تهیه نقشه فاصله از آبراهه جهت بررسی توسعه کارست مناسب‌ترین ارزیابی تشخیص داده شده است. لذا هر چه فاصله از آبراهه کمتر باشد ارزش بالاتری داده می‌شود و برعکس هرچه فاصله بیشتر شود ارزش کمتری داده می‌شود. لایه آبراهه‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تصویر پانکروماتیک ماهواره IRS تهیه شده است. جهت تصحیح خطاهای احتمالی با استفاده از Google Earth اصلاح شده‌اند. شکل (۴-۱۰) لایه فاصله از آبراهه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

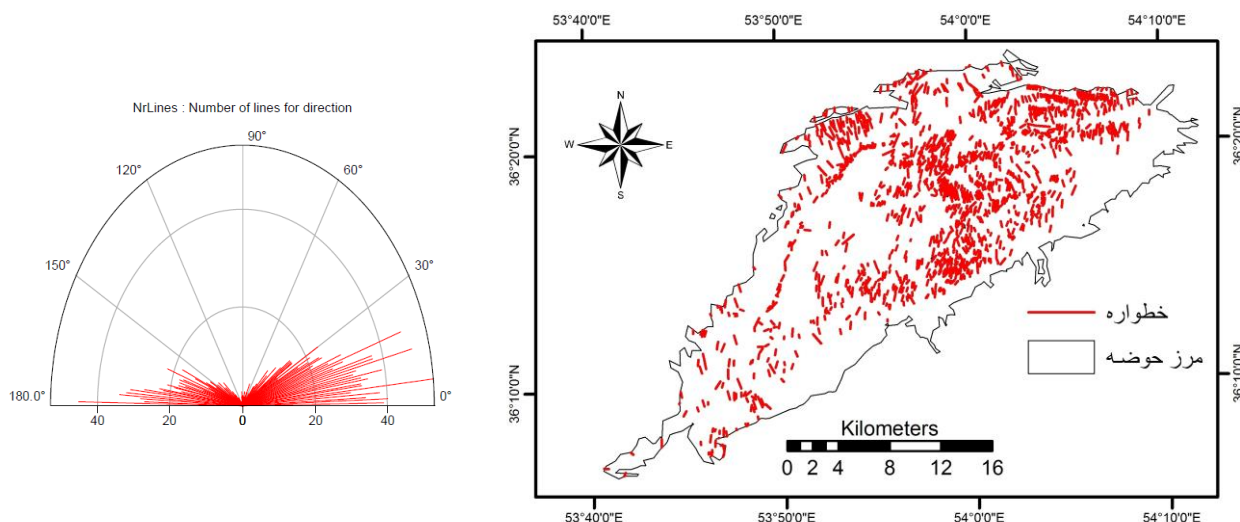


شکل ۴-۱۰- نقشه فاصله از آبراهه‌ها در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان

۴-۱-۱-۷- لایه فاصله از خطواره‌ها و گسل‌ها

با توجه به اینکه گسل‌ها همراه با جابه‌جایی و برش می‌باشند و تا عمق‌های زیادی تاثیر گذارند بنابراین اهمیت آن‌ها در عبور و نفوذ آب و در نتیجه توسعه کارست بیشتر از خطواره‌ها می‌باشد، بنابراین سعی شده است لایه خطواره‌ها و گسل‌ها جداگانه تهیه و وزن‌های متفاوتی به هر عامل اختصاص داده شود. بیشترین اطلاعات استخراجی خطواره‌ها، از عکس‌های ماهواره‌ای با دقت بالا استخراج می‌شود. بنابراین در مطالعه حاضر عکس پانکروماتیک ماهواره IRS (۸ سپتامبر ۲۰۰۷) با قدرت تفکیک مکانی ۵ متر از سازمان فضایی

کشور، تهیه گردید. با تبدیل فرمت مناسب، تصویر موجود به محیط نرم‌افزار ILWIS 3 برده شد و با اعمال فیلترهای جهتی مناسب اقدام به آشکارسازی خطواره‌های موجود گردید. فیلتر جهتی سوبل^{۲۴} در چهار جهت اصلی و همچنین فیلتر آشکار ساز لبه اعمال شد. جهت تصحیح و حذف خطواره‌های نادرست از قبیل فعالیت‌های انسانی نقشه تهیه شده با استفاده از Google Earth کنترل گردید. سپس جهت بررسی روند خطواره‌های استخراج شده نمودار گل سرخی^{۲۵} مربوط به تعداد آن‌ها تهیه شد (شکل ۴-۱۱). نقشه فاصله از خطواره‌ها با استفاده از تابع Distance در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 تهیه شد. شکل (۴-۱۲) نقشه فاصله از خطواره‌ها را نشان می‌دهد.

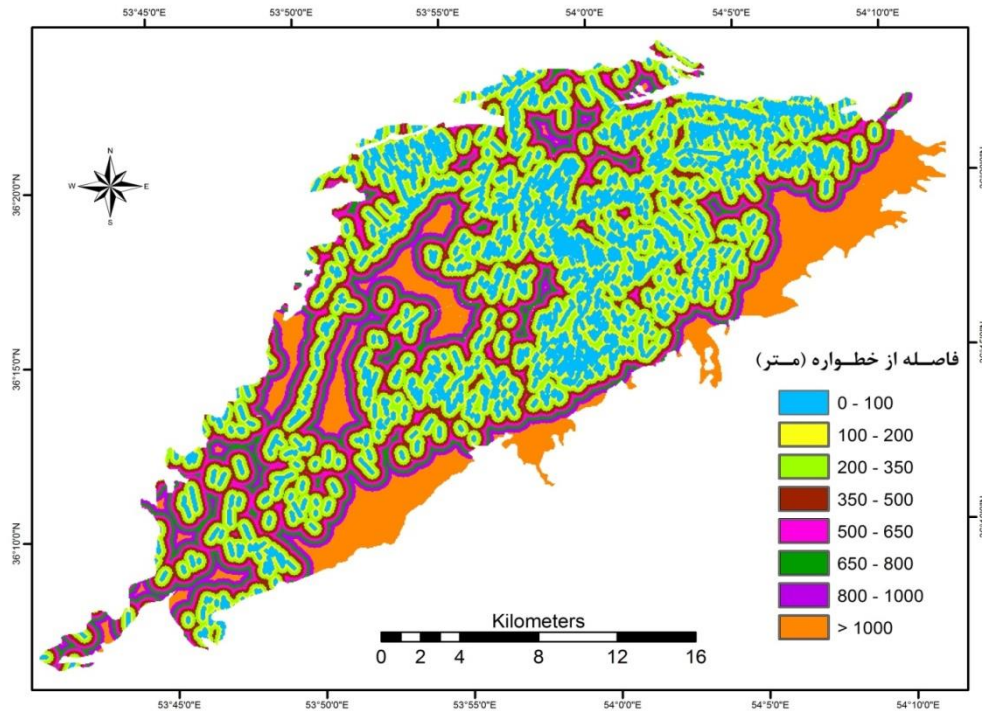


شکل ۴-۱۱- نقشه خطواره‌های استخراج شده و دیاگرام گل سرخی مربوط به آن

با توجه به اینکه خطواره‌ها و شکستگی‌ها به عنوان محل‌های با پتانسیل بالا برای نفوذ آب‌های سطحی می‌باشد لذا در نقشه تهیه شده به فاصله‌های کمتر ارزش بیشتر و به فاصله‌های بیشتر ارزش کمتری داده شد.

²⁴ Soble

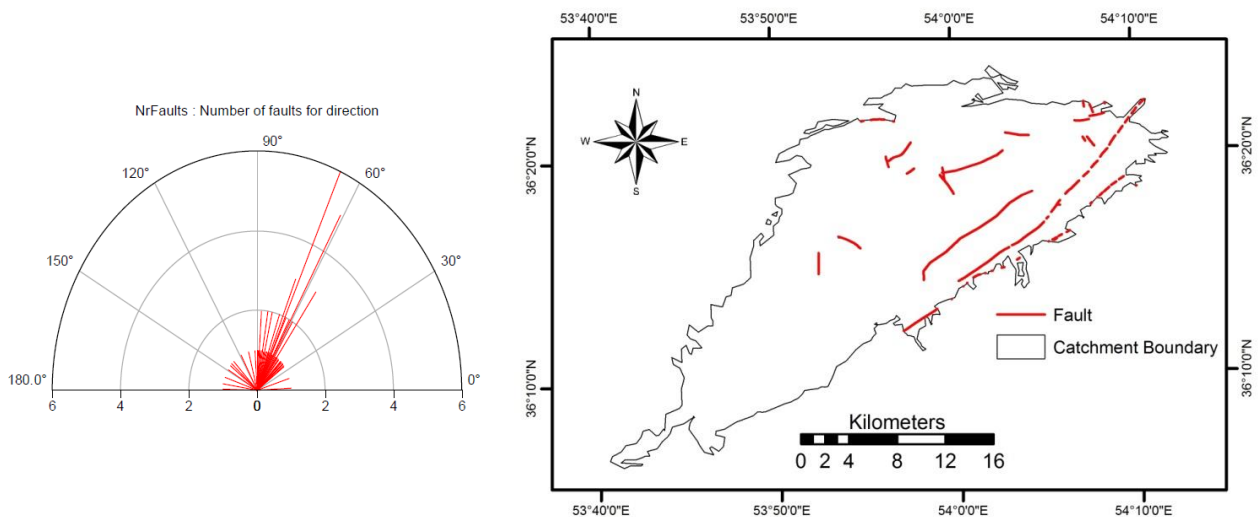
²⁵ Roze Diagram



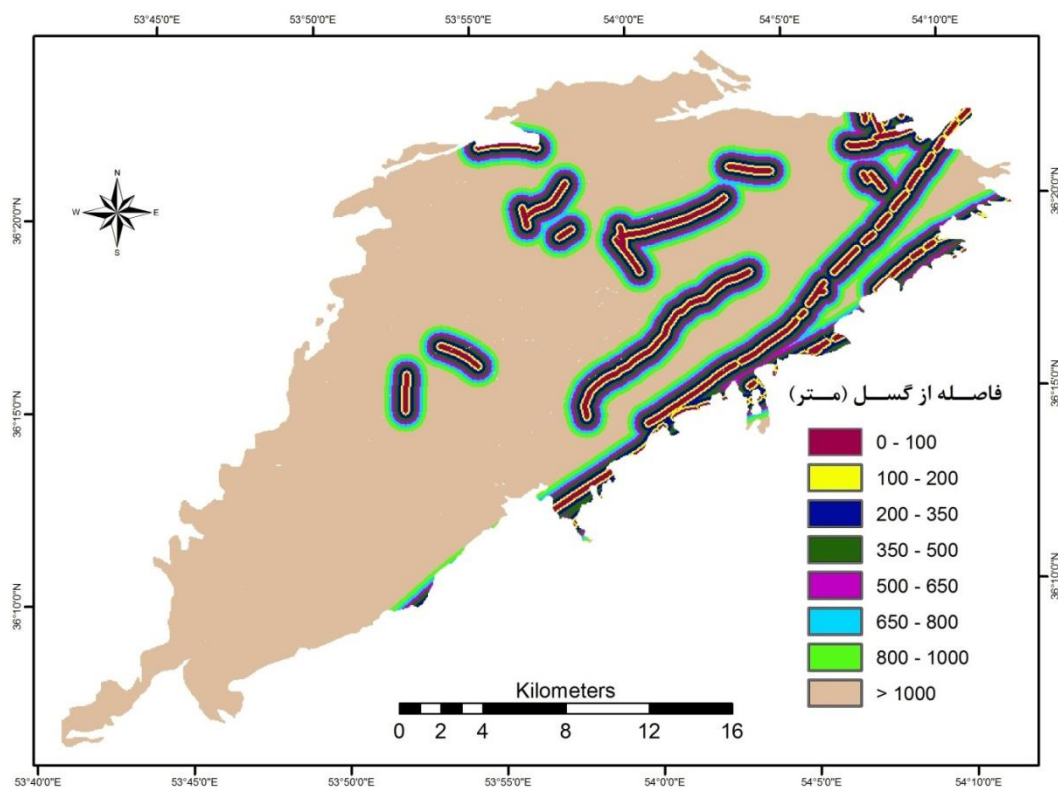
شکل ۴-۱۲- نقشه لایه فاصله از خطواره‌ها در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان

گسل‌های موجود در حوضه آبگیر با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی در نرم افزار Arc GIS 9.3 شناسایی و رقمی شدند (شکل ۴-۱۳). همچنین نمودار گل سرخی آن نیز ترسیم شد. سپس نقشه فاصله از گسل‌ها با

استفاده از تابع Distance تهیه شده که در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است



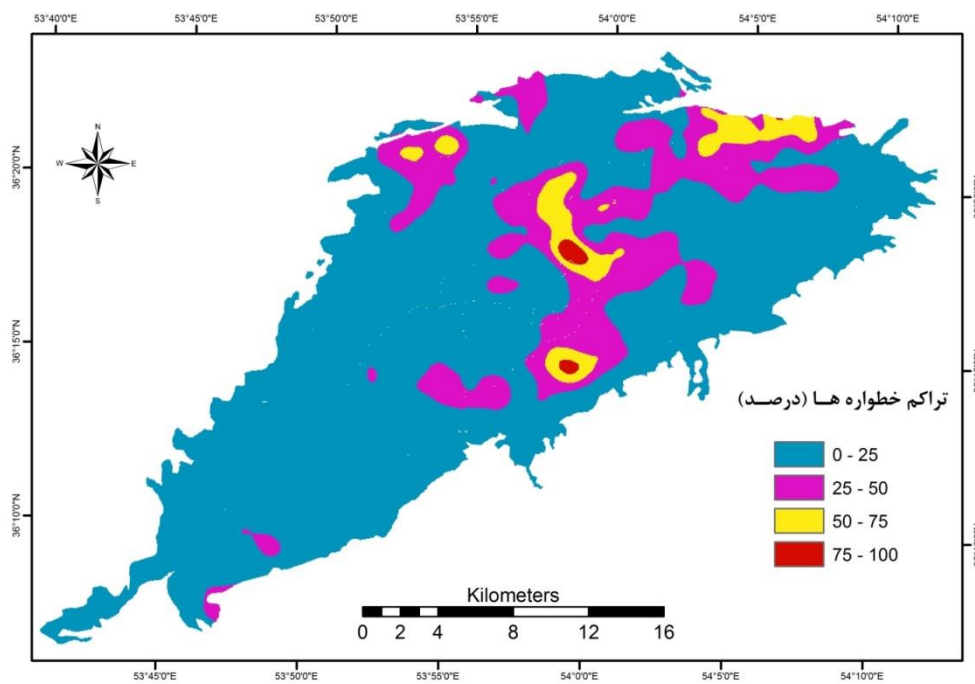
شکل ۴-۱۳- نقشه گسل‌های منطقه مورد مطالعه و دیاگرام گل سرخی مربوط به آن



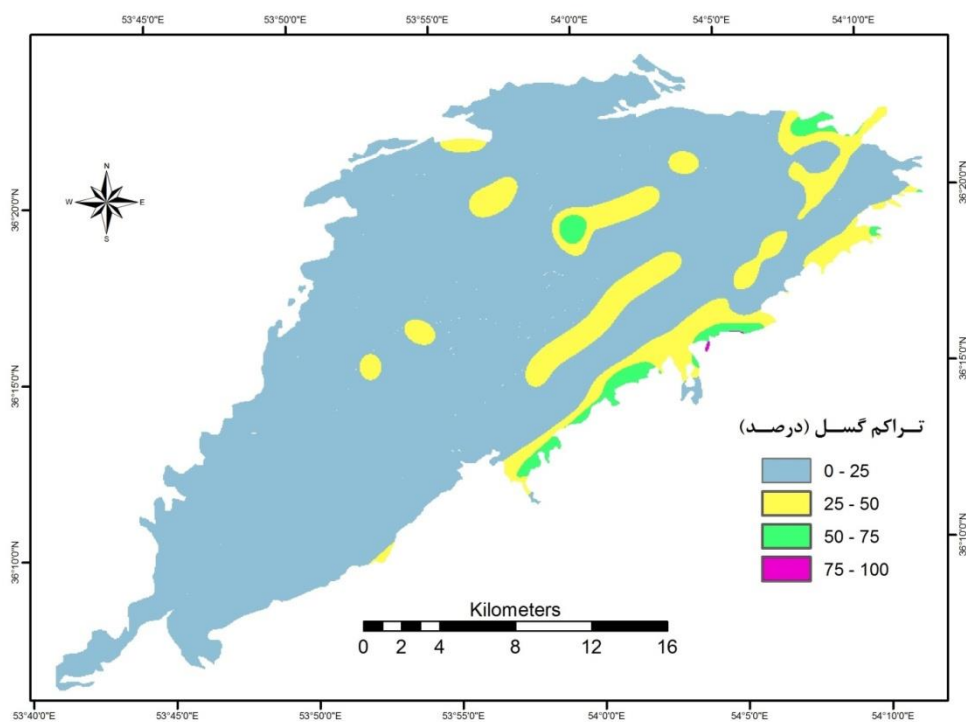
شکل ۴-۱۴- نقشه لایه فاصله از گسل‌ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان

۴-۱-۱-۸ لایه تراکم خطواره‌ها و گسل‌ها

هر چه تراکم خطواره‌ها و گسل‌ها در یک محدوده بیشتر باشد توسعه کارست نیز بیشتر است. لذا هر چه تراکم خطواره‌ها و گسل‌ها بیشتر باشد ارزش بیشتری داده می‌شود و برعکس. از آنجا که نقش و اهمیت گسل‌ها، به دلیل همراه بودن با جابه‌جایی و برش در توسعه کارست بیشتر می‌باشد لذا نقشه تراکم خطواره‌ها و گسل‌های موجود برای اعمال وزن‌های متفاوت در دو لایه مطالعاتی مجزا تهیه شدند. با استفاده از نقشه خطواره‌ها و گسل‌های تهیه شده، اقدام به تهیه نقشه تراکم خطواره‌ها و گسل‌های منطقه گردید. نقشه تراکم با استفاده از تابع تراکم (Density) در نرم افزار Arc GIS 9.3 تهیه شده است. شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به ترتیب نقشه تراکم خطواره‌ها و گسل‌های موجود در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵- نقشه تراکم خطواره‌ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان



شکل ۴-۱۶- نقشه تراکم گسل‌ها در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان

۴-۱-۲- هم مقیاس سازی لایه‌های اطلاعاتی و اهمیت آن

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در صورتی امکان پذیر است که لایه‌های موجود مقیاس‌های یکسان داشته باشند. در حالیکه نقشه‌های فوق دارای مقیاس‌های متفاوت متر برای فاصله، درجه برای شیب و درصد برای تراکم بودند لذا ابتدا لازم بود که این لایه‌های اطلاعاتی هم مقیاس شوند. در مطالعه حاضر هم مقیاس سازی به روش کارشناسی صورت گرفت و با توجه به دانش کارشناسی نقشه‌های مذکور در محدوده ارزش‌های ۰ تا ۹ طبقه‌بندی مجدد شدند. ارزش‌های انتخاب شده برای لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده در جدول ۴-۲ آمده است.

جدول ۴-۲- ارزش‌های داده شده در لایه‌های اطلاعاتی

ارزش	بارش (میلی‌متر)	ارزش	دما (درجه سانتی‌گراد)	ارزش	فاصله از خطواره و گسل (متر)	ارزش	لیتولوژی	ارزش
۰ - ۱۷۲	۱	۲/۸۵ - ۴/۱۹	۹	۰ - ۱۰۰	۹	شمشک	۰	
۱۷۲ - ۲۰۹	۲	۴/۱۹ - ۵/۵	۸	۱۰۰ - ۲۰۰	۸	دلیچای	۶	
۲۰۹ - ۲۴۵	۳	۵/۵ - ۶/۸۳	۷	۲۰۰ - ۳۵۰	۷	لار	۹	
۲۴۵ - ۲۸۱	۴	۶/۸۳ - ۸/۱۵	۶	۳۵۰ - ۵۰۰	۶	آهک کرتاسه	۹	
۲۸۱ - ۳۱۸	۵	۸/۱۵ - ۹/۵	۵	۵۰۰ - ۶۵۰	۵	فجن زیرین	۰	
۳۱۸ - ۳۵۴	۶	۹/۵ - ۱۰/۸	۴	۶۵۰ - ۸۰۰	۴	فجن فوقانی	۰	
۳۵۴ - ۳۹۰	۷	۱۰/۸ - ۱۲/۱۲	۳	۸۰۰ - ۱۰۰۰	۲	کرج	۰	
۳۹۰ - ۴۲۶	۸	۱۲/۱۲ - ۱۳/۴۵	۲	> ۱۰۰۰	۱	آبرفت	۰	
۴۲۶ - ۴۶۳	۹	۱۳/۴۵ - ۱۴/۸	۱	فاصله از آبراهه (متر)	ارزش	شیب (درجه)	ارزش	
پوشش گیاهی (درصد)	ارزش	تراکم خطواره و گسل (درصد)	ارزش	۰ - ۵۰	۹	۰ - ۶	۹	
۰ - ۲۵	۲	۰ - ۲۵	۲	۵۰ - ۱۰۰	۸	۶ - ۱۲	۸	
۲۵ - ۵۰	۴	۲۵ - ۵۰	۴	۱۰۰ - ۲۰۰	۶	۱۲ - ۲۰	۷	
۵۰ - ۷۵	۸	۵۰ - ۷۵	۷	۲۰۰ - ۳۰۰	۵	۲۰ - ۳۰	۶	
۷۵ - ۱۰۰	۹	۷۵ - ۱۰۰	۹	۳۰۰ - ۵۰۰	۳	۳۰ - ۴۰	۵	
				> ۵۰۰	۰	> ۴۰	۴	

۴-۱-۳- وزن دهی لایه‌های اطلاعاتی

باتوجه به اینکه تاثیر هر عامل در توسعه کارست متفاوت می‌باشد، لذا یکی از مراحل مهم پیش از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، تعیین اهمیت نسبی هر عامل و اختصاص دادن وزن به هر کدام از این عامل‌ها است. وزن دهی به هر لایه باید بر اساس ارزش و اهمیت آن در نفوذ و توسعه کارست باشد. در مطالعه حاضر با تهیه جدول AHP و ارائه آن به کارشناسان (جدول ۴-۳) هر عامل نسبت به سایر عامل‌های دیگر از نظر مقدار اهمیت آن در توسعه کارست مقایسه شده است. این عامل‌ها به صورت یک به یک نسبت به همدیگر مقایسه و ارزش گذاری شده‌اند. در نهایت وزن نسبی هر عامل محاسبه شده و در تهیه مدل توسعه کارست اعمال شده است. در مطالعه حاضر وزن‌های اعمال شده با توجه به نظر کارشناسان در جدول (۴-۴) آمده است. راهنمای واژه‌های به کار برده شده در جدول (۴-۳) به صورت زیر می‌باشد.

AB: Absolutely more important

ST: Strongly more important

WK: Weakly more important

VS: Very strongly more important

EQ: Equally important

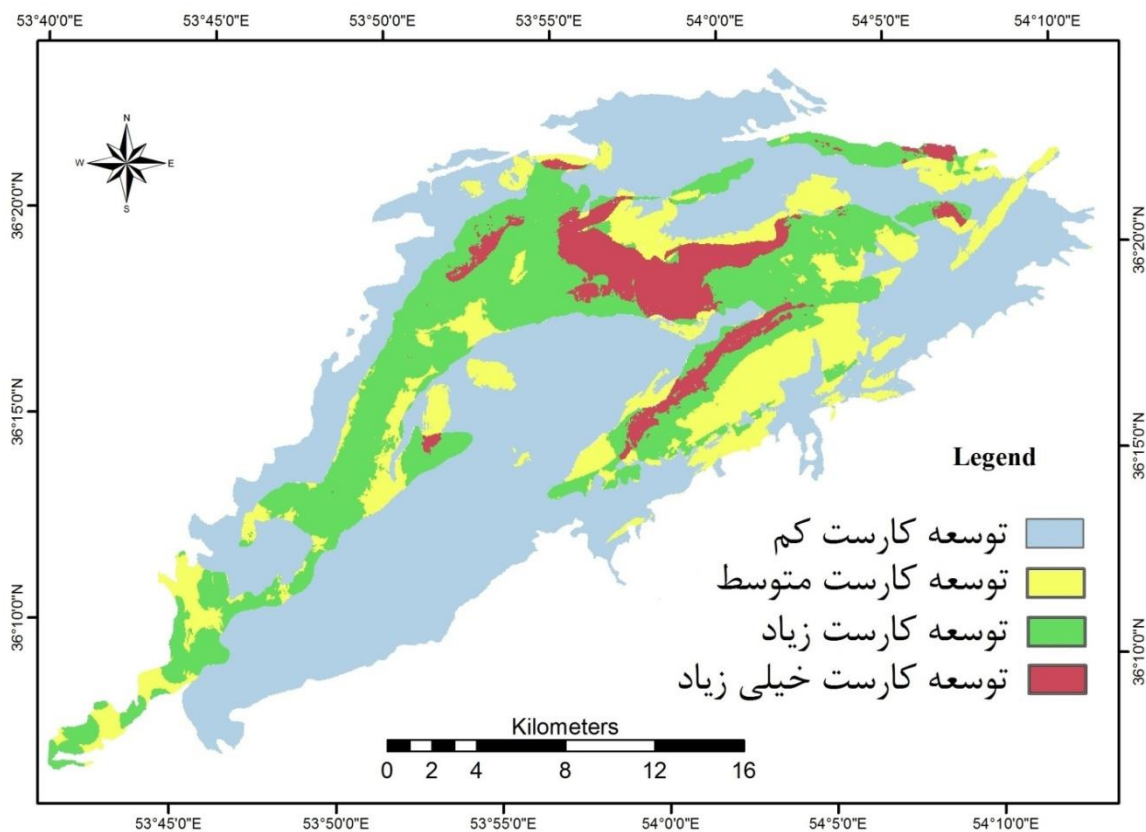
جدول ۴-۳- نمونه‌ی جدول AHP ارائه شده به کارشناسان

Evaluation item	Left item is more preferred (important)					EQ	Right item is more preferred (important)					Evaluation item
	AB	VS	ST	WK	WK		ST	VS	AB			
لینتولوژی												بارش
لینتولوژی												دما
لینتولوژی												شیب
لینتولوژی												پ گیاهی
لینتولوژی												آبراهه
لینتولوژی												تراکم خطواره
لینتولوژی												تراکم گسل
لینتولوژی												فاصله از خطواره
لینتولوژی												فاصله از گسل
بارش												دما
بارش												شیب
بارش												پ گیاهی
بارش												آبراهه
بارش												تراکم خطواره
بارش												تراکم گسل
بارش												فاصله از خطواره
بارش												فاصله از گسل
دما												شیب
دما												پ گیاهی
دما												آبراهه
دما												تراکم خطواره
دما												تراکم گسل
دما												فاصله از خطواره
دما												فاصله از گسل
شیب												پ گیاهی
شیب												آبراهه
شیب												تراکم خطواره
شیب												تراکم گسل
شیب												فاصله از خطواره
شیب												فاصله از گسل
پ گیاهی												آبراهه
پ گیاهی												تراکم خطواره
پ گیاهی												تراکم گسل
پ گیاهی												فاصله از خطواره
پ گیاهی												فاصله از گسل
آبراهه												تراکم خطواره
آبراهه												تراکم گسل
آبراهه												فاصله از خطواره
آبراهه												فاصله از گسل
تراکم خطواره												تراکم گسل
تراکم خطواره												فاصله از خطواره
تراکم خطواره												فاصله از گسل
تراکم گسل												فاصله از خطواره
تراکم گسل												فاصله از گسل
فاصله از خطواره												فاصله از گسل

جدول ۴-۴- مقدار وزن لایه‌های اطلاعاتی به دست آمده به روش AHP

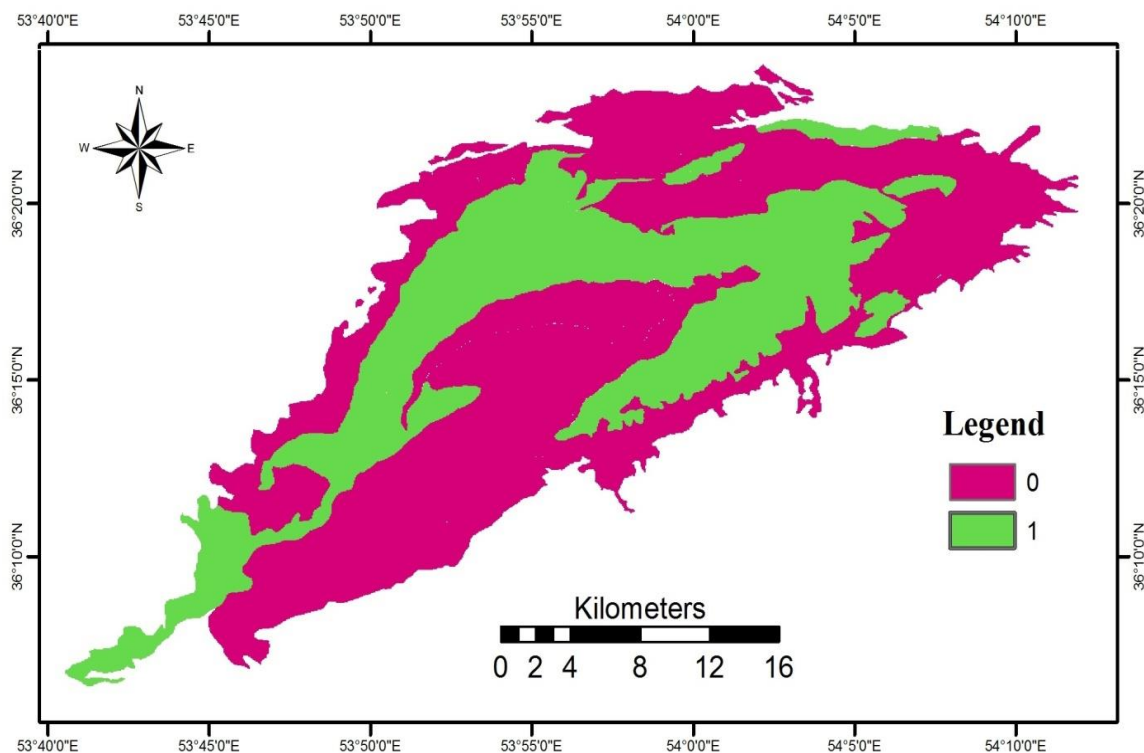
وزن	نام لایه
۲۴٪	لیتولوژی
۱۳٪	بارش
۱۸٪	تراکم گسل
۱۵٪	تراکم خطواره‌ها
۱۱٪	فاصله از گسل
۹٪	فاصله از خطواره‌ها
۵٪	پوشش گیاهی
۲٪	فاصله از آبراهه‌ها
۲٪	شیب
۱٪	دما

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در صورتی امکان پذیر است که همه لایه‌های تهیه شده به صورت رستری با اندازه پیکسل‌های یکسان باشند. در واقع در همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی، پیکسل‌های نظیر به نظیر با همدیگر تلفیق می‌شوند. در مطالعه حاضر همه لایه‌های تهیه شده به صورت رستری با اندازه پیکسل‌های ۵۰ متر در ۵۰ متر تهیه شده و با دستور Weighted Overlay که از مجموعه دستورات نرم افزار Arc GIS می‌باشد با اعمال وزن‌های کارشناسی شده با همدیگر تلفیق شده‌اند. نتیجه این ترکیب نقشه رستری خواهد بود که هر پیکسل دارای ارزشی بوده که نمایانگر پتانسیل توسعه کارست در آن پیکسل با توجه به موقعیت مکانی مربوط به خود می‌باشد (شکل ۴-۱۷). نقشه تهیه شده قابلیت کارستی شدن منطقه را نشان می‌دهد اما مشکلی که نقشه تهیه شده دارد این است که مناطقی که از سازندهای غیرکارستی می‌باشد نیز جزء مناطق با توسعه کم کارست در نظر گرفته شده است. جهت اصلاح و برطرف شدن این مشکل لایه اطلاعاتی تهیه شد که به سازندهای کارستی ارزش یک و نواحی غیرکارستی ارزش صفر داده شد (شکل ۴-۱۸). در حقیقت این



شکل ۴-۱۷- نقشه اولیه توسعه کارست

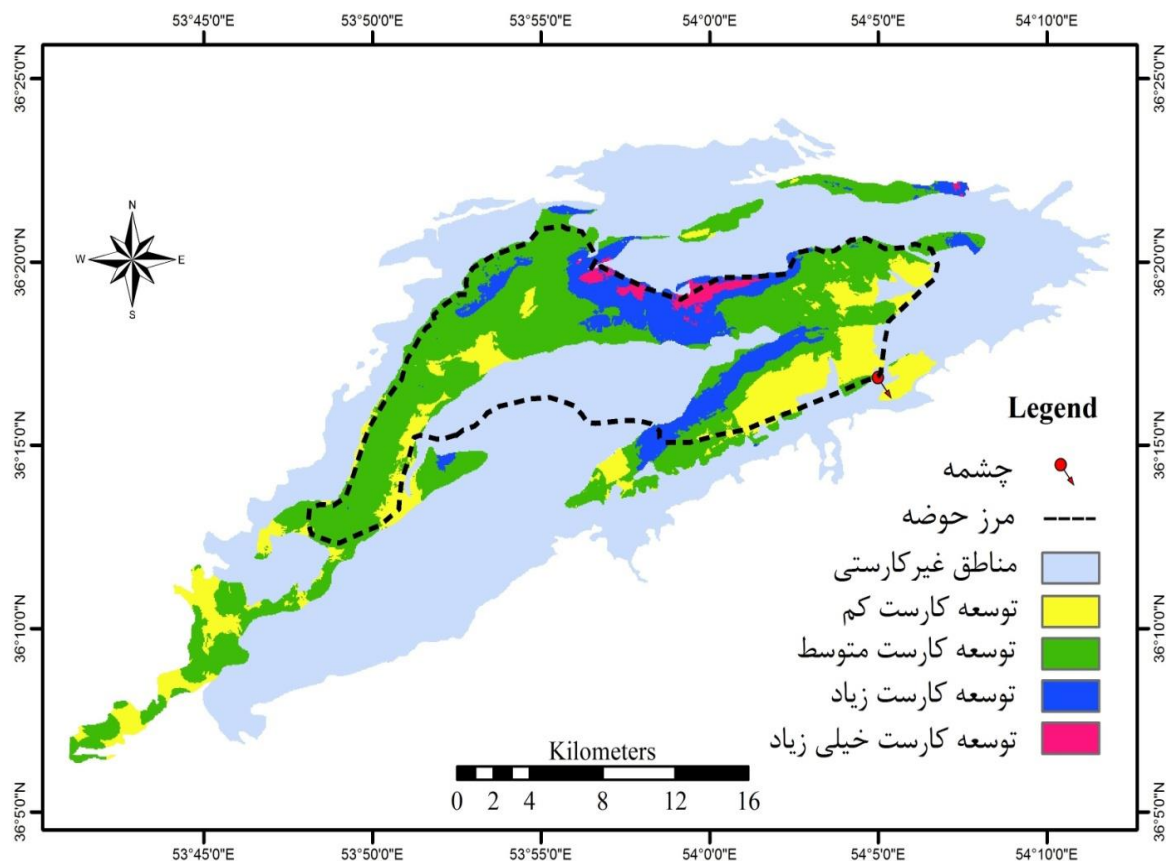
لایه اطلاعاتی جهت جدا سازی مناطق کارستی از غیرکارستی تهیه شده است. با ضرب کردن این لایه اطلاعاتی با دستور Raster Calculator در نرم افزار Arc GIS در نقشه اولیه توسعه کارست نواحی غیرکارستی ارزش صفر داده شده و از نواحی کارستی مجزا می‌گردند. سپس نقشه تهیه شده دوباره Reclassify شده و نقشه نهایی توسعه کارست تهیه می‌گردد.



شکل ۴-۱۸- لایه اطلاعاتی جدا سازی مناطق کارستی از غیر کارستی

شکل (۴-۱۹) نقشه نهایی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان، همراه با موقعیت چشمه و حوضه آبگیر آن (در رابطه با حوضه آبگیر چشمه در فصل بعد توضیحات کامل آورده شده است) نشان داده شده است. با توجه به این شکل نواحی کارستی نزدیک چشمه که بیشتر سازند دلیچای می‌باشد، توسعه کم کارست را نشان می‌دهد. این سازند به دلیل وجود ناخالصی‌های رسی و مارن، استعداد بالای در توسعه کارست ندارد که با توجه به مشاهدات صحرایی تنها به صورت پراکنده آثار حفرات باران مشاهده شده و فاقد اشکال توسعه یافته کارست همانند کارن‌های انحلالی می‌باشد، صحت آن تایید می‌گردد. همچنین با مشاهدات صحرایی در تاقدیس شمالی که آهک‌های لار و کرتاسه می‌باشد وجود اشکال انحلال یافته با عمق قابل توجه از کارن‌های انحلالی با استعداد بالای سازندهای منطقه مؤید توسعه بالای کارست و صحت مدل تهیه شده است. با توجه به مدل تهیه شده تنها ناحیه کوچکی از منطقه که بیشترین ارتفاعات حوضه با ارتفاع ۳۲۵۰ متر است دارای توسعه خیلی زیاد کارست می‌باشد. وجود فروچاله که خاص نواحی با توسعه

بالای کارست می‌باشد در این ناحیه دور از نظر نیست. به علت فاصله خیلی زیاد پیمایش و نبود امکانات کافی، بازدید صحرایی این ناحیه مقدور نبوده است.



شکل ۴-۱۹- نقشه نهایی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان

درصد و مساحت هر کدام از نواحی تشکیل دهنده حوضه آبگیر چشمه علی در جدول (۴-۵) آمده است. مناطق با توسعه کارست متوسط، دارای بیشترین مقدار درصد تشکیل دهنده حوضه آبگیر می‌باشد. با توجه به توپوگرافی و خط تقسیم آب‌های سطحی، حدود ۴۳ کیلومتر مربع از نواحی غیر کارستی نیز می‌تواند در تشکیل حوضه آبگیر چشمه علی سهیم باشد. سازندهای تشکیل دهنده این نواحی فجن و کرج است که با توجه به بازدیدهای صحرایی، لیتولوژی این سازندها دارای ماسه سنگ و مارن بسیار سخت و تاجر یافته می‌باشد به طوری که عملاً میزان درصد نفوذ از بدنه این سازندها بسیار پایین می‌باشد. وجود درزه و

شکستگی‌ها تنها راه نفوذ آب‌های سطحی می‌باشد که با توجه به ضخامت زیاد این سازندها و عمق محدود درزه و شکستگی‌ها عملاً مقدار درصد نفوذ کلی این نواحی بسیار پایین و قابل اغماض است. بنابراین مساحت تشکیل دهنده حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان نواحی کارستی می‌باشد که با توجه به تجربه دیگران در مناطق مختلف کشور و برآورد کارشناسی درصد نفوذ و بیلان هیدروژئولوژیکی چشمه (در فصل بعد توضیح داده می‌شود) حوضه آبرگیر چشمه محدود به مناطق کارستی بالا دست چشمه‌علی می‌باشد.

جدول ۴-۵- درصد و مساحت نواحی مختلف توسعه کارست در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان

تقسیم بندی مناطق کارستی	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
توسعه کارست کم	۲۴/۳	۱۸/۱۳
توسعه کارست متوسط	۸۱	۶۰/۴۵
توسعه زیاد کارست	۲۵/۱	۱۸/۷۳
توسعه خیلی زیاد کارست	۳/۵۸	۲/۶۷

۴-۲- شاخص کارست شدگی در شکستگی‌های حوضه آبرگیر چشمه‌علی

همانگونه که گفته شد در حوضه آبرگیر چشمه‌علی عوارض مشخص ژئومورفولوژی نواحی کارستی از قبیل فروچاله (Sinkhole)، پولیه و شفت وجود ندارد ولی بیشتر نواحی آن دارای درزه و شکستگی‌های فراوانی می‌باشد که مناطق تغذیه حوضه را شامل می‌شوند. جهت بدست آوردن شاخص کارست شدگی شکستگی‌ها، مشخصات شکستگی‌های منطقه مورد مطالعه در ۱۲ ایستگاه اندازه‌گیری، برداشت گردید. ابتدا مساحت پنجره اندازه‌گیری، گرفته شد سپس تعداد شکستگی‌ها، مقدار بازشدگی، فاصله شکستگی‌ها نسبت به همدیگر، طول شکستگی‌ها و شیب و امتداد تمامی شکستگی‌ها موجود در هر ایستگاه، برداشت شد. اندازه-

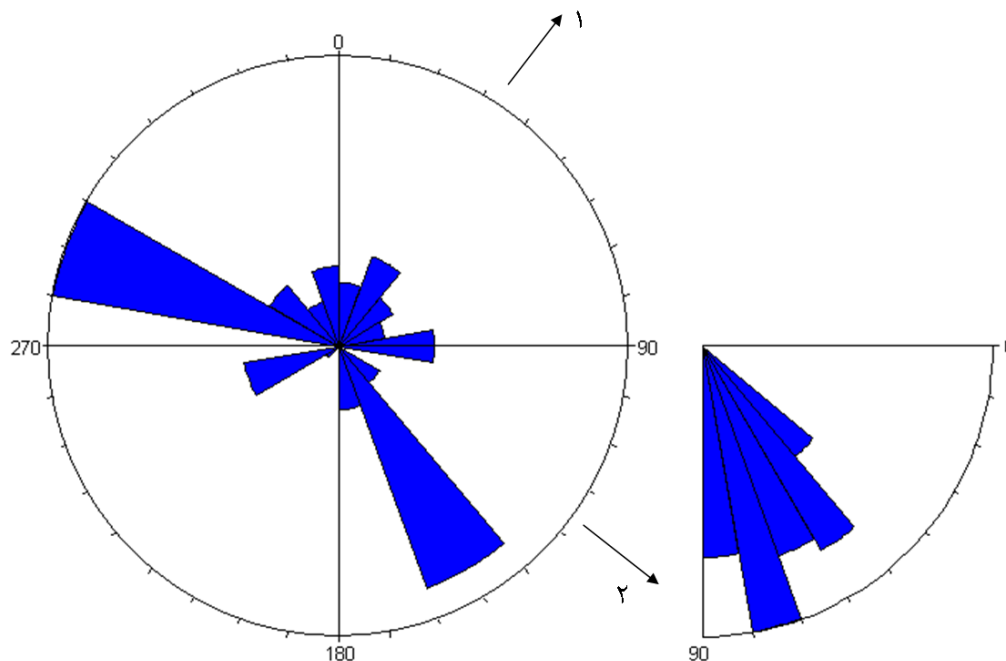
گیری مشخصات درزه‌ها با دقت بالایی انجام شده است. مقدار بازشدگی شکستگی‌های ریز در حد میلی متر با کولیس و شکستگی‌های بزرگتر در حد سانتی متر با خط کش گرفته شده است. فاصله شکستگی‌ها از همدیگر و طول آن‌ها با متر اندازه‌گیری شده است. و در مواردی به دلیل صعب العبور بودن و نبود امکان اندازه‌گیری، طول آن‌ها تخمین زده شده است. شکل (۴-۲۰) نمونه‌ای از شکستگی‌های اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۰- شکستگی‌های مشاهده شده در دو ایستگاه اندازه‌گیری مختلف

لازم به ذکر است انتخاب محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری به گونه‌ای بوده است که تا حد امکان از سازندهای مختلف موجود در منطقه اندازه‌گیری صورت گیرد. با استفاده از نرم افزار Tectonic FP و Rockwork 14 شیب و امتداد شکستگی‌های اندازه‌گیری شده به صورت نمودار گل سرخی^{۲۶} تهیه گردید که در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دو دسته شکستگی اصلی را تفکیک نمود.

²⁶ Rose diagram



شکل ۴-۲۱- نمودار گل سرخی امتدادی و شیبی شکستگی‌های اندازه‌گیری شده

دسته ۱ با روند N32E که به دلیل اینکه امتدادشان با محور اصلی چین خوردگی حوضه موازی می‌باشد می‌توان شکستگی از نوع طولی نامگذاری کرد.

دسته ۲ با روند S55E که به دلیل اینکه امتدادشان عمود بر محور اصلی چین خوردگی حوضه می‌باشد می‌توان شکستگی از نوع عرضی نامگذاری کرد.

فراوانی دسته درزه عرضی به مراتب بیشتر از درزه‌های طولی می‌باشد. همچنین با توجه به نمودار گل سرخی شیبی نتیجه می‌شود که شکستگی‌های موجود دارای شیب زیادی می‌باشند. شیب زیاد این شکستگی‌ها در نفوذ سریع‌تر آب‌های سطحی تاثیر بسزایی دارد. فورد و ویلیام (Ford and Williams, 2007) بیان نموده‌اند که تغییرات زیاد جهت شیب درزه‌ها در موقعیت‌های مکانی نزدیک به هم و محدود بودن عمق تاثیر آن‌ها به چند متر سطح زمین، درزه‌ها بیشتر در تغذیه آبخوان تاثیرگذارند و در جهت‌گیری کلی آب‌های زیرزمینی تاثیری ندارند. جدول (۴-۶) مشخصات شکستگی‌ها در ایستگاه‌های اندازه‌گیری حوضه آبرگیر چشمه‌علی را نشان می‌دهد. میانگین مساحت کل ایستگاه‌ها ۲۷ مترمربع و میانگین بازشدگی

شکستگی‌ها برابر $2/16$ سانتی‌متر می‌باشد. به طور کلی میانگین بازشدگی شکستگی‌ها در ایستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در سازند دلیچای کمتر از میانگین بازشدگی ایستگاه‌های اندازه‌گیری در آهک‌های لار و کرتاسه می‌باشد. که به دلیل خلوص و پتانسیل بالای آهک‌های لار و کرتاسه در انحلال و توسعه کارست می‌باشد. با توجه به مشخصات شکستگی‌ها در هر ایستگاه، شدت شکستگی‌ها (I_f) با استفاده از رابطه (۲-۷) محاسبه شده است. شاخص کارستی شدن شکستگی‌ها (I_k) از حاصلضرب شدت شکستگی‌ها در میانگین بازشدگی شکستگی‌های ایستگاه در واحد متر بدست می‌آید. ملاحظه می‌شود که مقادیر شاخص کارستی شدن شکستگی‌ها در بیشتر ایستگاه‌ها اعداد نسبتاً بزرگی می‌باشد. با توجه به جدول (۴-۶)، و جدول ارائه شده (۲-۱) شاخص کارست‌شدگی ایستگاه‌های پنج و هفت در رده نواحی خوب کارستی شده و سایر ایستگاه‌ها در رده خیلی کارستی شده قرار می‌گیرد. میانگین شاخص کارست‌شدگی کل ایستگاه‌های اندازه‌گیری برابر 12225 و در رده خیلی کارستی شده قرار می‌گیرد. در واقع حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان با توجه به رده بندی توسعه شکستگی‌های ارائه شده توسط علوی و چابانی (Aloui and Chaabani, 2006) که برای منطقه کارستی جبل فریانا (Jebel Feriana) در تونس ارائه شده است جزء مناطق خیلی کارستی شده می‌باشد. از آنجا که ویژگی شکستگی‌های هر منطقه محلی و خاص منطقه مربوط به خود است، شاید مقایسه مقدار توسعه شکستگی‌های هر منطقه بر اساس رده‌بندی مناطق دیگر نادرست باشد. از سوی دیگر ویژگی شکستگی‌های هر منطقه تابعی از تکتونیک حاکم بر آن منطقه و شرایط تکتونیکی خاص آن ناحیه است. همچنین تعداد اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های برداشتی نیز در نتیجه‌گیری نهایی تاثیرگذار است و هرچه تعداد اندازه‌گیری‌ها بیشتر باشد محاسبات به واقعیت نزدیک‌تر می‌گردد. از آنجا که درزه و شکستگی‌ها عوامل سطحی مناطق کارستی هستند، لذا به شدت تحت تاثیر هوازگی می‌باشند و اندازه‌گیری بازشدگی درزه‌ها و شکستگی‌های که هوازده باشند باعث خطا در محاسبات می‌شود. به طور کلی اندازه‌گیری توسعه شکستگی‌های مناطق کارستی، پیچیدگی و مشکلات مربوط به خود را دارد که نیازمند اندازه‌گیری‌های بیشتر با دقت زیاد و صرف وقت بیشتر می‌باشد و در نهایت با در نظر گرفتن ضریبی از فعالیت تکتونیک

جدول ۴-۶- مشخصات شکستگی‌ها در ایستگاه‌های مختلف اندازه‌گیری

I_k	I_f	میانگین بازشدگی (cm)	مساحت اندازه گیری (m ²)	میانگین فاصله شکستگی ازهم (cm)	تعداد شکستگی	محل	سازند	ردیف
۴۹۲۰	۴/۱×۱۰ ^۵	۱/۲	۲۳	۶۴	۶	۳۶°۱۷'۰۳" ۵۴°۰۳'۱۳"	دلیچای	۱
۹۶۰۰	۱/۲×۱۰ ^۶	۰/۸	۲۸	۳۰/۵	۱۰	۳۶°۱۷'۱۲" ۵۴°۰۳'۳۵"	دلیچای	۲
۸۴۷۶	۵/۲×۱۰ ^۵	۱/۶۳	۳۳	۸۲/۳	۱۴	۳۶°۱۵'۲۸" ۵۴°۰۰'۵۱"	دلیچای	۳
۸۲۳۵	۶/۱×۱۰ ^۵	۱/۳۵	۲۵	۵۲	۸	۳۶°۱۴'۲۱" ۵۳°۵۸'۴۸"	دلیچای	۴
۲۲۰۰	۲/۰×۱۰ ^۵	۱/۱	۳۵	۱۱۵	۸	۳۶°۱۷'۵۰" ۵۴°۰۳'۰۳"	دلیچای	۵
۶۱۶۰	۴/۴×۱۰ ^۵	۱/۴	۱۵	۹۰	۶	۳۶°۱۸'۱۰" ۵۴°۰۲'۱۴"	کرتاسه	۶
۲۴۴۴	۹/۴×۱۰ ^۴	۲/۶	۴۱	۱۳۰	۵	۳۶°۱۷'۵۷" ۵۴°۰۱'۴۴"	کرتاسه	۷
۱۴۰۰۰	۴/۰×۱۰ ^۵	۳/۵	۲۶	۷۰	۷	۳۶°۱۷'۳۵" ۵۴°۰۱'۱۹"	کرتاسه	۸
۱۹۲۰۰	۱/۲×۱۰ ^۶	۱/۶	۱۳	۳۷	۶	۳۶°۱۷'۵۹" ۵۳°۵۱'۱۰"	لار	۹
۱۴۱۰۸	۴/۷×۱۰ ^۵	۲/۹۵	۲۰	۱۱۵	۱۱	۳۶°۱۷'۴۷" ۵۳°۵۱'۳۱"	لار	۱۰
۴۶۲۰۰	۱/۱×۱۰ ^۶	۴/۲	۳۰	۵۵	۱۸	۳۶°۱۷'۳۴" ۵۳°۵۱'۵۷"	لار	۱۱
۱۱۱۶۰	۳/۱×۱۰ ^۵	۳/۶	۳۸	۱۲۰	۱۴	۳۶°۱۷'۴۷" ۵۳°۵۲'۱۰"	لار	۱۲

منطقه امکان مقایسه توسعه شکستگی‌های مناطق کارستی متفاوت را بتوان برقرار ساخت.

فصل پنجم

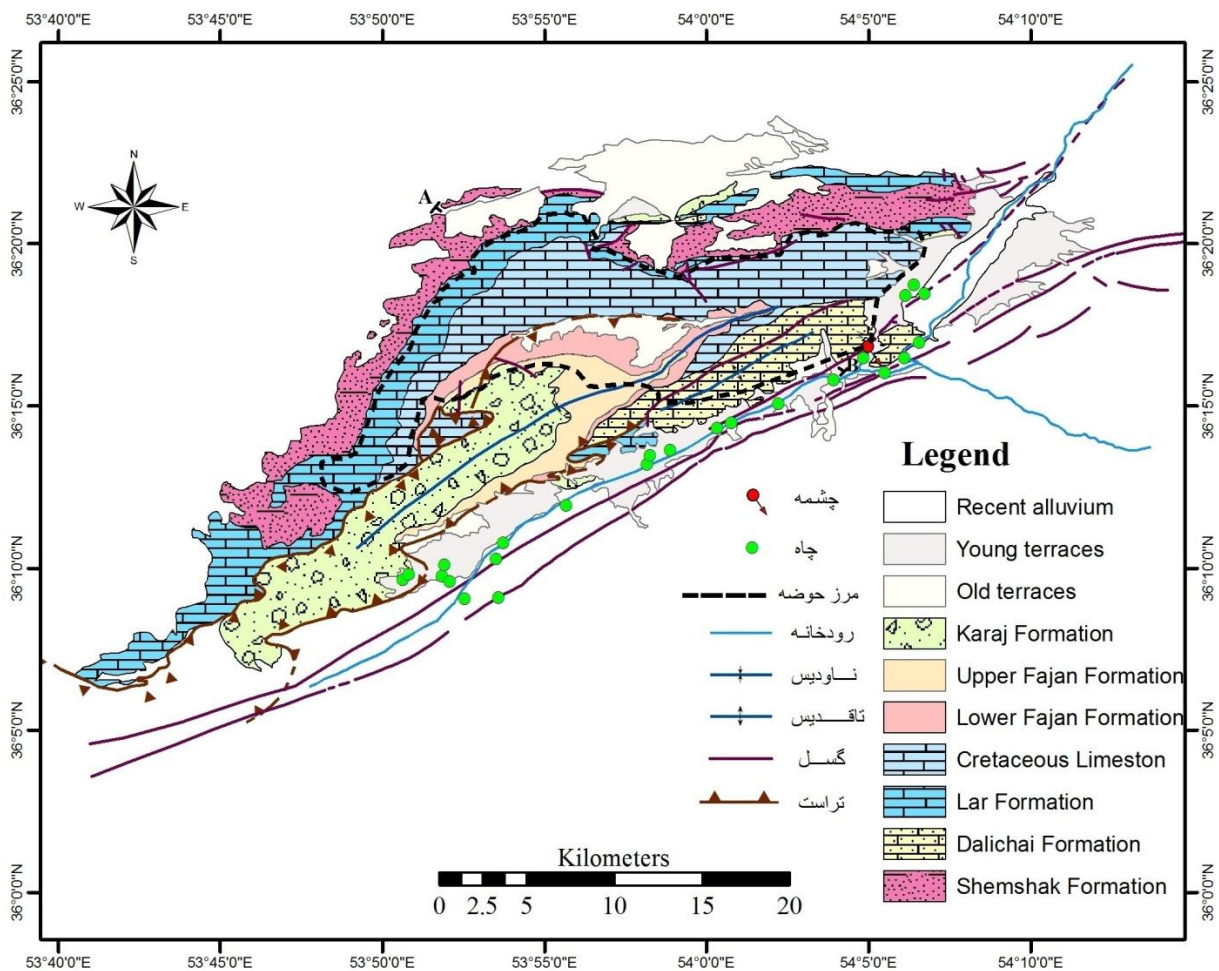
تحلیل داده‌های هیدروژئولوژیکی

جهت ارزیابی و تعیین نوع جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی می‌توان از تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه استفاده کرد. کرمی (۱۳۸۳) با بررسی چشمه‌علی و تغییرپذیری اندک کلیه خواص فیزیکی و شیمیایی آن در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ نتیجه گرفته است که سیستم غالب جریان آب زیرزمینی در این آبخوان از نوع سیستم افشان است. در این فصل ابتدا با استفاده از گزارش مطالعات قبلی (کرمی، ۱۳۸۳) اقدام به برآورد مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌علی شد. جهت ارزیابی مجدد رفتار چشمه در شش مرحله در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ کلیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه اندازه‌گیری گردید. هدف از ارزیابی مجدد، بررسی تغییر احتمالی رفتار چشمه و شناخت بیشتر توده آبخوان بوده است. در ادامه ضرایب فرود منحنی چشمه و همچنین حجم ذخیره دینامیک آبخوان به دو روش مایلت و مانجین محاسبه شده‌اند. سپس شاخص‌های کارستی شدن آبخوان چشمه‌علی با استفاده از هیدروگراف و کموگراف محاسبه و مورد بحث واقع می‌گردند. در نهایت جهت بررسی تاثیر تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت جریان آب زیرزمینی در حوضه آبرگیر چشمه ارتباط هیدرولیکی موجود در حوضه نقد و بررسی شده است.

۵-۱ تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌علی

به منظور بدست آوردن مساحت دقیق حوضه آبرگیر چشمه‌علی از روش‌های هیدروژئولوژیکی پیشنهاد شده توسط Karimi et al (2005) و Ashjari and Raeisi (2006) رابطه (۳-۵) استفاده شده است. در مطالعه حاضر جهت تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌علی از داده‌های آبدهی چشمه در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ (کرمی، ۱۳۸۳) استفاده شده است. مقایسه آبدهی چشمه در ابتدا و انتهای سال آبی تفاوت یک لیتر در ثانیه را نشان می‌دهد که می‌توان آن را قابل اغماض دانست. به عبارتی در طول این سال آبی، نه آبی ذخیره شده است و نه آبی از آبخوان آزاد گردیده است ($\Delta S=0$). با استفاده از میانگین بارندگی ایستگاه آستانه در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ که برابر ۹۹ میلی‌متر و ارتفاع این ایستگاه که برابر ۱۴۵۰ متر می‌باشد، میانگین بارندگی ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه ۲۵۷ میلی‌متر برآورد می‌شود. مقدار تخلیه سالانه چشمه در این سال آبی با توجه به مطالعات قبلی (کرمی، ۱۳۸۳) برابر ۱۲/۹۷ میلیون مترمکعب محاسبه گردید. از آنجا که منطقه فاقد عوارض مهم کارستی همچون آبروچاله، غار و فاکتورهای دیگر انحلالی که موثر بر میزان تغذیه می‌باشد، بر اساس مشاهدات صحرایی و نظر کارشناسی و همچنین تجربه دیگران در مناطق مختلف کشور، ضریب نفوذ برای آهک‌های منطقه مورد مطالعه ۰/۳۸ لحاظ گردید. لذا مساحت حوضه آبرگیر بر اساس رابطه فوق، ۱۳۲ کیلومتر مربع محاسبه می‌شود. محدود شدن جریان آب زیرزمینی در نواحی شمالی منطقه مورد مطالعه توسط ماسه سنگ، سیلتستون و شیل‌های شمشک مرز شمالی حوضه آبرگیر تعیین شد. با کمک گرفتن از پارامترهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و خطوط تقسیم آب‌های سطحی و وجود سطح اساس فرسایش در موقعیت چشمه، حوضه آبرگیر چشمه بر روی نقشه تعیین شد که محدود به ارتفاعات آهکی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۵-۱). لازم به توضیح است که با توجه به پارامترهای زمین‌شناسی حدود ۴۳ کیلومتر مربع از مناطق غیرکارستی که شامل سازندهای فجن و کرج می‌باشد می‌تواند سهم بسیار ناچیزی در تغذیه این آبخوان داشته باشد. سازندهای فجن و کرج با لیتولوژی متراکم خود و نداشتن گسل و شکستگی‌های عمقی قابل توجه عملاً دارای درصد نفوذ بسیار پایین و ناچیزی می‌باشند. به طوری که این

مقدار مساحت، عملاً" با درصد نفوذ بسیار کم خود می‌تواند سهمی به مقدار ۲ کیلومتر مربع از آهک‌های منطقه مورد مطالعه در تغذیه آبخوان داشته باشد که این مقدار درصد خطا نسبت به مساحت کلی آبخوان قابل نظر کردن است. با توجه به توضیحات بالا در شکل (۵-۱) محدوده حوضه آبرگیر چشمه‌علی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، حوضه آبرگیر چشمه‌علی یک حوضه کشیده و باریک است که با توجه به مساحت بسیار زیاد خود در تغذیه مداوم و پیوسته چشمه و پایداری چشمه تاثیرگذار است. اینک با مشخص شدن وضعیت حوضه آبرگیر چشمه، تفسیر تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آن بهتر صورت می‌گیرد. در ادامه به بررسی تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه پرداخته می‌شود.



شکل ۵-۱- محدوده حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان

۵-۲- تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه

مطالعات بیشماری در زمینه تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی صورت گرفته است. زولت (Zolt, 1960) و گامز (Gams, 1966) اولین کسانی بودند که تغییرات شیمیایی چشمه‌ها را به نوع جریان لایه آبدار زیرزمینی ارتباط دادند. شاستر و وایت (Shuster and White, 1971) تغییرات دما، هدایت الکتریکی و غلظت یون‌های کلسیم، بی‌کربنات و منیزیم را با آبدهی چشمه در یک سال آبی اندازه‌گیری کردند و بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، به دو نوع جریان افشان و مجرای تقسیم نمودند. این محققین پس از بررسی، تغییرات پارامترهای دما و سختی کل را مناسب‌ترین معیار برای تقسیم‌بندی لایه آبدار کارستی تشخیص دادند. و برای مقایسه لایه‌های آبدار کارستی مختلف از ضریب تغییرات این پارامترها استفاده کردند. اندازه‌گیری‌های جدید پارامترهای فیزیکی چشمه‌علی در محل چشمه اندازه‌گیری شده و پارامترهای شیمیایی از نتایج داده‌های آزمایشگاهی پارک علم و فناوری شهرستان شاهرود گرفته شده است. در زیر به بررسی تغییرات این پارامترها پرداخته شده است.

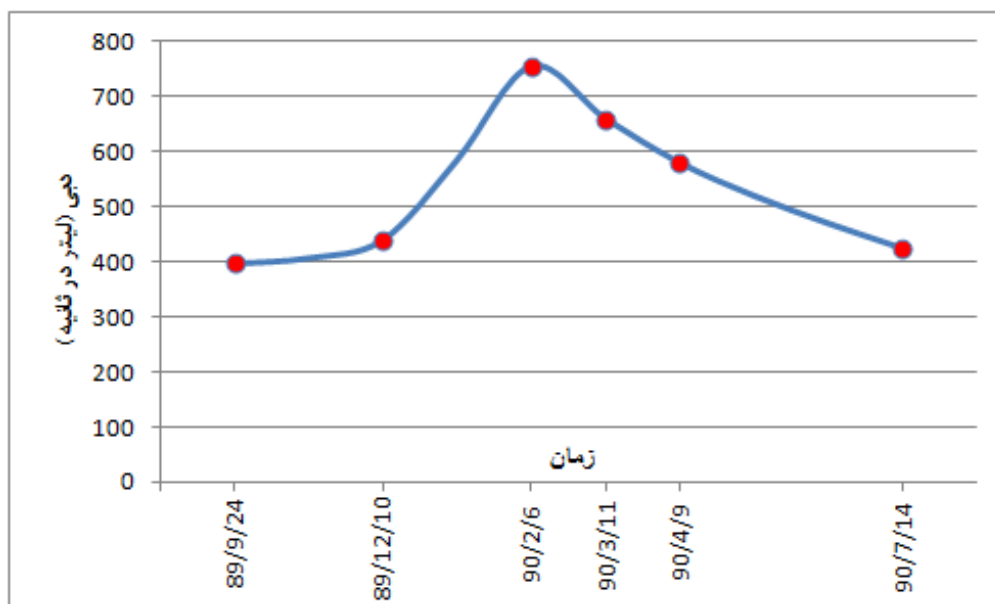
۵-۲-۱ تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکی چشمه‌علی

خصوصیات فیزیکی چشمه از قبیل دبی، هدایت الکتریکی، دما و pH در محل چشمه اندازه‌گیری شده است. فشار جزئی دی‌اکسیدکربن محلول در آب با استفاده از نرم افزار Phreeqc محاسبه شد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها به همراه میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات در جدول (۵-۱) مشاهده می‌شود. با توجه به جدول (۵-۱) کمترین دبی چشمه ۳۹۷ لیتر در ثانیه و بیشترین دبی برابر ۷۵۵ لیتر در ثانیه مربوط به اردیبهشت ماه می‌باشد. نسبت دبی ماکزیمم به مینیمم برابر ۱/۹ است. تغییرات درجه حرارت و pH آب بسیار کم بوده است. کمترین مقدار هدایت الکتریکی ۵۴۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی ۵۷۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد.

جدول ۵-۱ مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه

پارامتر					تاریخ نمونه‌برداری
pH	فشار جزیی دی اکسید کربن (atm)	هدایت الکتریکی ($\mu\text{s/cm}$)	درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)	دبی (l/s)	
۷/۴۶	$9/2 \times 10^{-3}$	۵۴۵	۱۴/۴	۳۹۷	۱۳۸۹/۹/۲۴
۷/۶۳	$6/1 \times 10^{-3}$	۵۵۷	۱۴/۵	۴۴۰	۱۳۸۹/۱۲/۱۰
۷/۶۳	$6/2 \times 10^{-3}$	۵۵۱	۱۴/۲	۷۵۵	۱۳۹۰/۲/۶
۷/۶۲	$6/4 \times 10^{-3}$	۵۶۴	۱۴/۴	۶۶۰	۱۳۹۰/۳/۱۱
۷/۶۰	$6/8 \times 10^{-3}$	۵۶۰	۱۴/۶	۵۸۰	۱۳۹۰/۴/۹
۷/۵۸	$7/3 \times 10^{-3}$	۵۷۰	۱۴/۶	۴۲۵	۱۳۹۰/۷/۱۴
۷/۵۸	7×10^{-3}	۵۵۷/۸	۱۴/۴۵	۵۴۲/۸	میانگین
۰/۰۶۵	$1/16 \times 10^{-3}$	۸/۹۷	۰/۱۵۱	۱۴۵/۵	انحراف معیار
۰/۸۵	$1/66 \times 10^{-1}$	۱/۶	۱	۲۶/۹	درصد ضریب تغییرات

هیدروگراف چشمه در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. یال بالارونده هیدروگراف چشمه از اسفند ۱۳۸۹ تا اردیبهشت ۱۳۹۰ با افزایش قابل توجهی در دبی، با شیب زیادی روند صعودی دارد و از زمان کاهش دبی با شیب کمی روند کاهشی را نشان می‌دهد. به طور کلی پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده دارای ضریب تغییرات بسیار پایین می‌باشند. اما ضریب تغییرات دبی نسبتاً قابل توجه است. جهت مقایسه کلی تغییرات رفتار چشمه، مقادیر ضریب تغییرات جدول فوق با ضریب تغییرات همان پارامترها در سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ (کرمی، ۱۳۸۳) مقایسه شدند (جدول ۵-۲). با توجه به این جدول درصد ضریب تغییرات پارامترهای درجه حرارت، هدایت الکتریکی و pH مشابه اما درصد ضریب تغییرات دبی تفاوت قابل توجهی دارند.

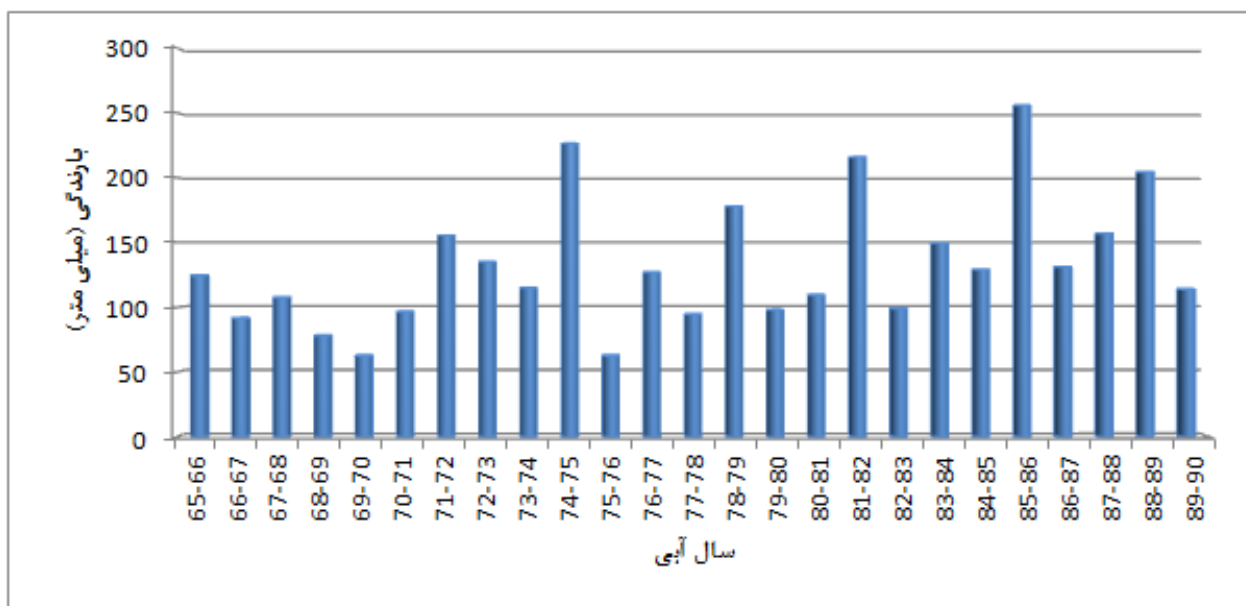


شکل ۵-۲- هیدروگراف چشمه علی از آذر ماه ۱۳۸۹ تا مهر ماه ۱۳۹۰

با توجه به گزارش‌ها و نتایج کرمی (۱۳۸۳) کمترین دبی چشمه در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ برابر ۳۹۰ لیتر در ثانیه و بیشترین دبی ۴۳۵ لیتر در ثانیه بوده است. نسبت دبی حداکثر به حداقل در این سال برابر ۱/۱ می‌باشد. مقایسه میانگین بارندگی ایستگاه باران سنجی آستانه در دو سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ و ۱۳۹۰-۱۳۸۹ مشاهده می‌شود که میانگین بارندگی در این دو سال آبی به ترتیب ۹۹ و ۱۱۴ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۵-۳). در واقع افزایش ۱۵ میلی‌متری بارندگی در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ مشاهده می‌شود. اولین سوالی که به نظر خواهد رسید، آیا این مقدار افزایش بارش منجر به افزایش دبی چشمه در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ شده است؟

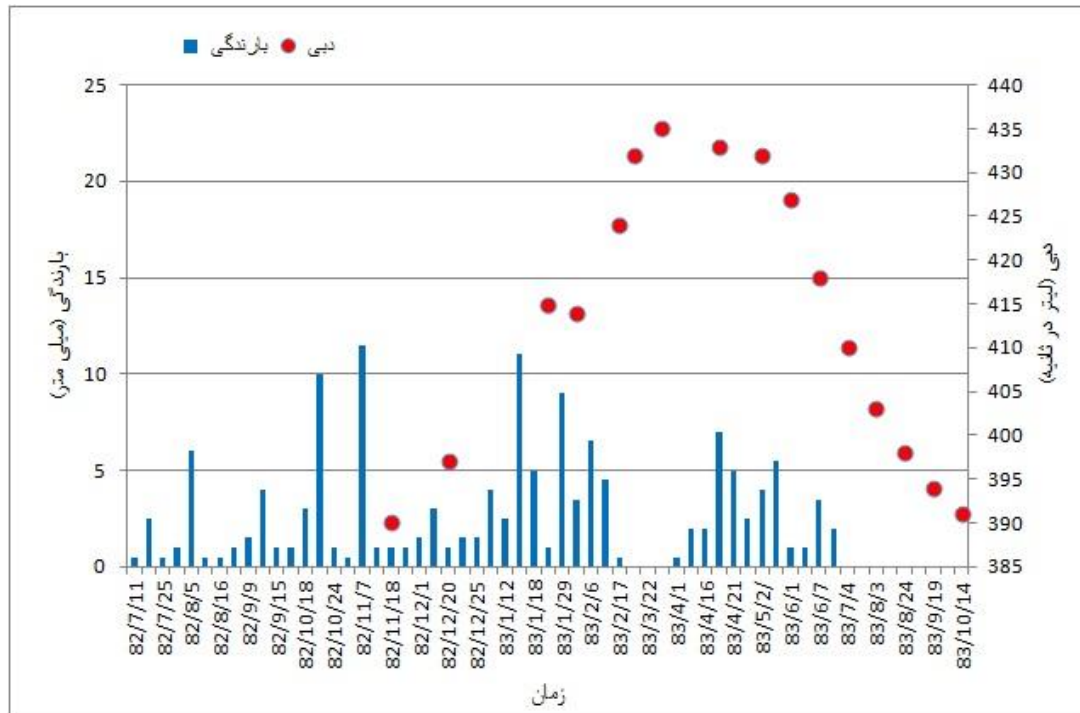
جدول ۵-۲- مقایسه ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکی چشمه علی در دو سال آبی متفاوت

pH	هدایت الکتریکی ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)	دبی (l/s)	ضریب تغییرات (درصد)	سال آبی
۱/۶۶	۱/۴۲	۱/۳۸	۳/۹۱	۱۳۸۲-۱۳۸۳	
۰/۸۵	۱/۶	۱	۲۶/۹	۱۳۸۹-۱۳۹۰	



شکل ۵-۳- میانگین بارندگی سالانه نزدیک‌ترین ایستگاه بارندگی (ایستگاه آستانه) به چشمه علی

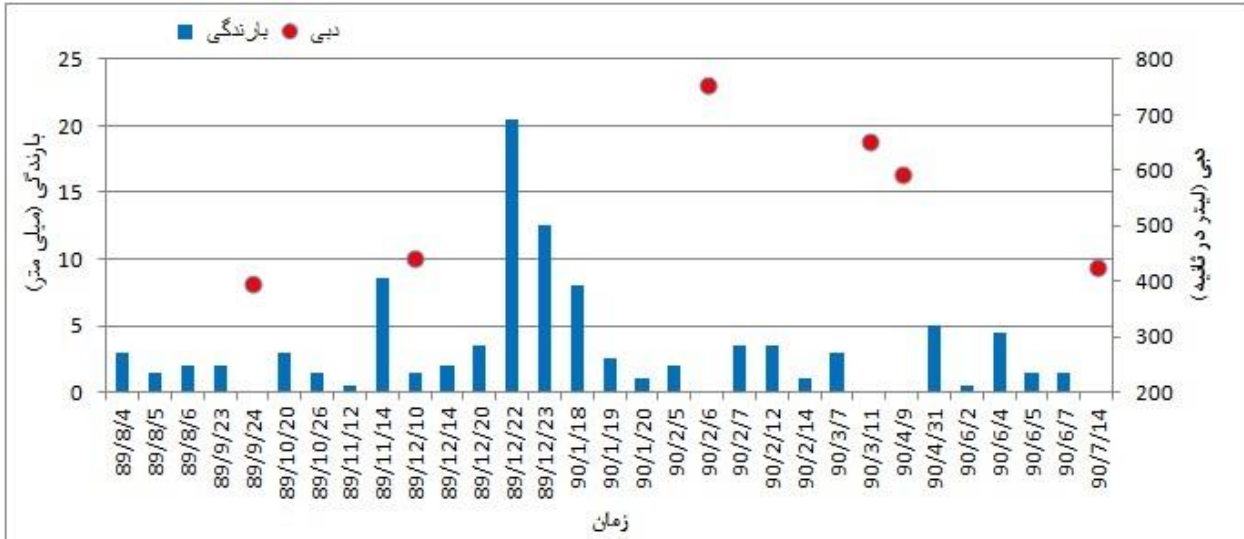
با بررسی توزیع بارندگی‌های روزانه ایستگاه باران سنجی آستانه در این دو سال آبی (شکل ۵-۴ و ۵-۵) مشاهده شد که اولین بارش قابل توجه در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ در پنجم آبان ماه ۱۳۸۲ صورت گرفته است و حداکثر بارندگی روزانه این سال آبی ۱۱/۵ میلی‌متر بوده است. بارندگی‌های نزدیک این مقدار دو مورد در دی و بهمن ماه ۱۳۸۲ و یک مورد دیگر در فروردین ۱۳۸۳ صورت گرفته است. به طور کلی بارندگی‌های این سال آبی یکنواخت با مقادیر کم بوده است. به همین دلیل تغییرات زیادی در دبی چشمه، مشاهده نشده است. و پاسخ چشمه به این بارش‌ها کم بوده و تنها دبی از ۳۹۰ لیتر در ثانیه به حداکثر ۴۳۳ لیتر در ثانیه افزایش داشته است. اما با ترسیم توزیع بارندگی‌های روزانه ایستگاه باران سنجی آستانه، همراه با مقادیر دبی چشمه در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ (شکل ۵-۵) نشان می‌دهد که اولین بارندگی قابل توجه در چهاردهم بهمن ماه ۱۳۸۹ صورت گرفته است. در نگاه کلی این شکل بارش‌های با مقادیر متفاوت و با توزیع‌های ناهم‌انگ را نشان می‌دهد. در اسفند ماه ۱۳۸۹ بیشترین بارندگی‌ها صورت گرفته است. به طوری که در سه روز بیستم تا بیست و سوم اسفند ماه در مجموع ۳۶/۵ میلی‌متر بارندگی رخ داده است.



شکل ۴-۵- توزیع بارندگی و تغییرات دبی سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ (کرمی، ۱۳۸۳)

با توجه به ارتفاع ایستگاه باران سنجی آستانه (۱۴۵۰ متر) و ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه‌علی (۲۱۰۰ متر) برآورد می‌شود که حدود ۵۳ میلی‌متر بارندگی در این سه روز بر حوضه آبرگیر چشمه‌علی صورت گرفته است. با استفاده از رابطه آبدهی ویژه که به صورت تجربی $0/05$ در نظر گرفته می‌شود، این مقدار بارندگی با توجه به مساحت حوضه و درصد نفوذ برآورد شده برای منطقه (۳۸ درصد) می‌تواند باعث افزایش $2/66$ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی در آبخوان و افزایش $40/3$ سانتی‌متر آب‌های زیرزمینی در آبخوان شود. بنابراین افزایش دبی چشمه از ۴۴۰ لیتر در ثانیه در اسفند ماه ۱۳۸۹ به ۷۵۵ لیتر در ثانیه در اردیبهشت ماه ۱۳۹۰ تنها به دلیل بارش‌های ناگهانی صورت گرفته در سه روز بیستم تا بیست و سوم اسفند ماه سال ۱۳۸۹ بر این حوضه بوده است. از سوی دیگر با بررسی دقیق وضعیت بارش و دبی مشاهده می‌شود که زمان تاخیر (Lag time) دبی به بارندگی در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ حدود پنج ماه می‌باشد در حالیکه این مقدار در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ به حدود دو ماه کاهش یافته است. مهمترین نتیجه‌ای که از مطالب فوق نتیجه می‌شود وجود حداقل یک یا چند مجرای بزرگ و کاندویتی در نزدیک سطح ایستابی آبخوان است که با

افزایش سطح ایستابی، آب به یکی از این مجراها وارد شده و با جریان سریع در این مجرا بر روی خروجی و آبدهی چشمه تاثیرگذار می‌باشد.

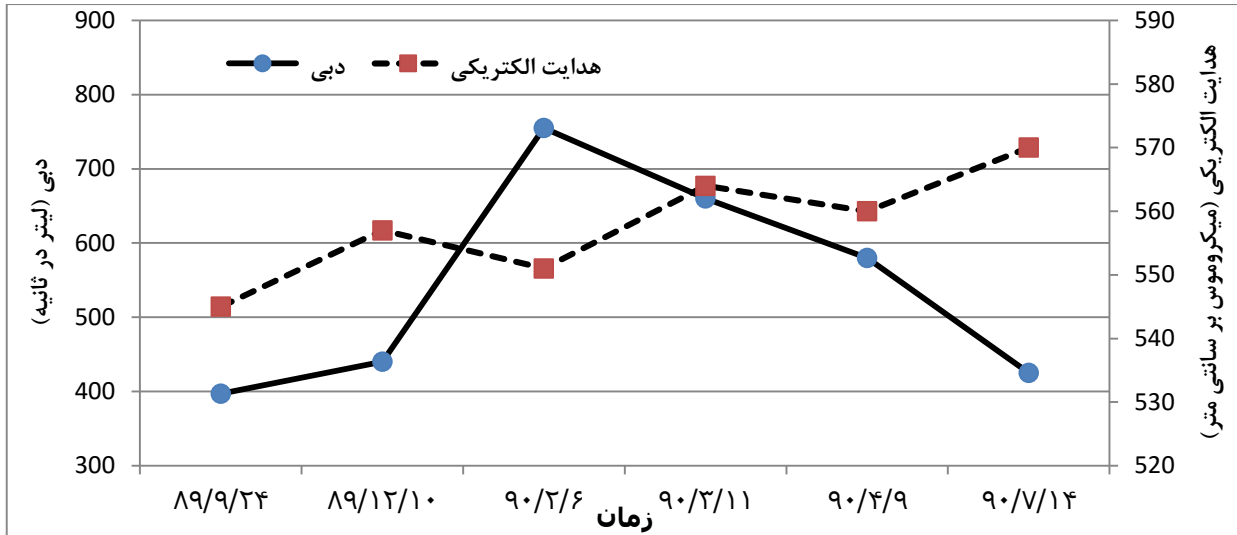


شکل ۵-۵- توزیع بارندگی و تغییرات دبی سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰

۵-۲-۲- تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و آبدهی چشمه

تغییرات هدایت الکتریکی و روند آن بیانگر میزان زمان ماندگاری آب در آبخوان و جنس آن می‌باشد. با افزایش زمان ماندگاری آب در آبخوان، مدت زمان تماس آب با توده آبخوان نیز افزایش می‌یابد بنابراین انحلال بیشتری صورت گرفته و در نتیجه هدایت الکتریکی آب افزایش می‌یابد. تغییرات هدایت الکتریکی را معمولاً با آبدهی چشمه مقایسه می‌کنند. با افزایش آبدهی و افزایش سرعت جریان، از زمان ماندگاری آب زیرزمینی در آبخوان کاسته شده و در نتیجه مقدار انحلال و هدایت الکتریکی آب کاهش می‌یابد بنابراین به طور عادی در مرحله فروکش چشمه روند دبی و تغییرات هدایت الکتریکی عکس هم می‌باشند. شکل (۵-۶) تغییرات هدایت الکتریکی چشمه‌علی را در مقایسه با تغییرات آبدهی نشان می‌دهد. به طور کلی رابطه عکسی بین تغییرات دبی چشمه و هدایت الکتریکی مشاهده می‌شود. با افزایش دبی در اردیبهشت ماه هدایت الکتریکی کاهش یافته که نشان دهنده تخلیه جریان‌های سریع تغذیه کننده نواحی نزدیک‌تر به چشمه می‌باشد. در تیر ماه با کاهش دبی، کاهش اندکی در هدایت الکتریکی نسبت به خرداد ماه مشاهده

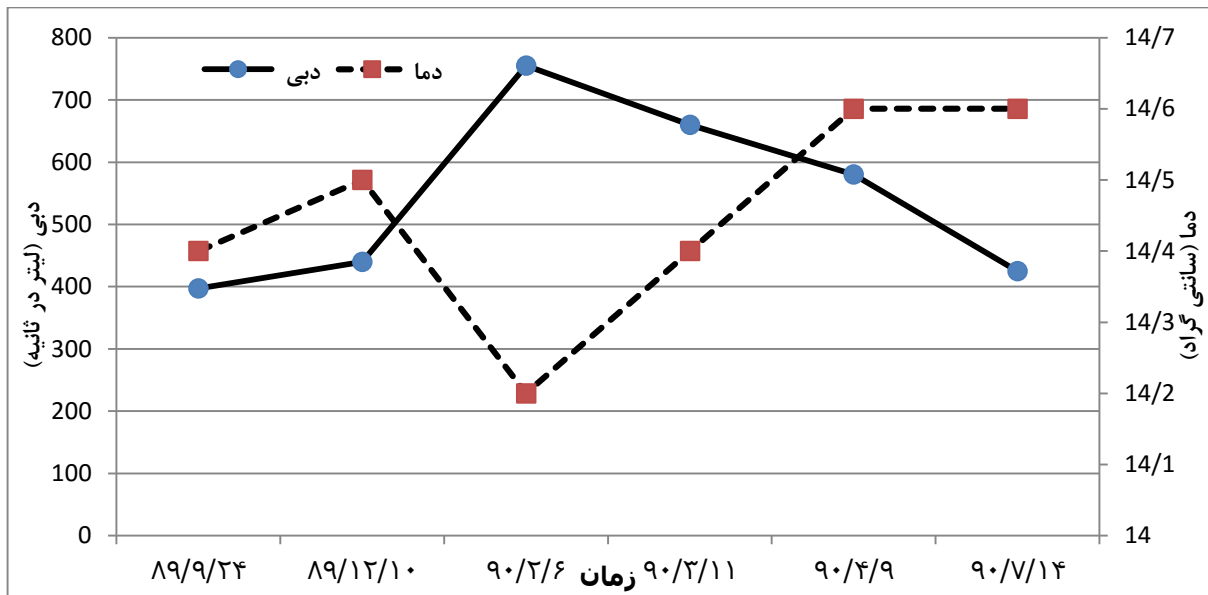
می‌شود. این رفتار غیرعادی می‌تواند نشان دهنده تغذیه از مسیرهای دیگری باشد که باعث کاهش هدایت الکتریکی شده است.



شکل ۵-۶- تغییرات هدایت الکتریکی و دبی چشمه علی

۵-۲-۳- تغییرات زمانی دما و آبدهی چشمه

بسیاری از محققین (Shuster and White, 1971) بیان کرده‌اند که درجه حرارت آب زیرزمینی یکی از مهمترین پارامترهای فیزیکی، جهت تعیین نوع جریان در آبخوان‌های کارستی می‌باشد. تغییرات دما در مقایسه با تغییرات دبی بررسی می‌شود. روند تغییرات دبی و درجه حرارت چشمه‌علی در شکل (۵-۷) مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، رابطه معکوس بین تغییرات دبی و درجه حرارت مشهود است. بیشترین مقدار دبی چشمه با کمترین مقدار درجه حرارت همزمان است و با کاهش دبی افزایش طبیعی در روند درجه حرارت مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۷- تغییرات زمانی دما و آبدهی چشمه‌علی

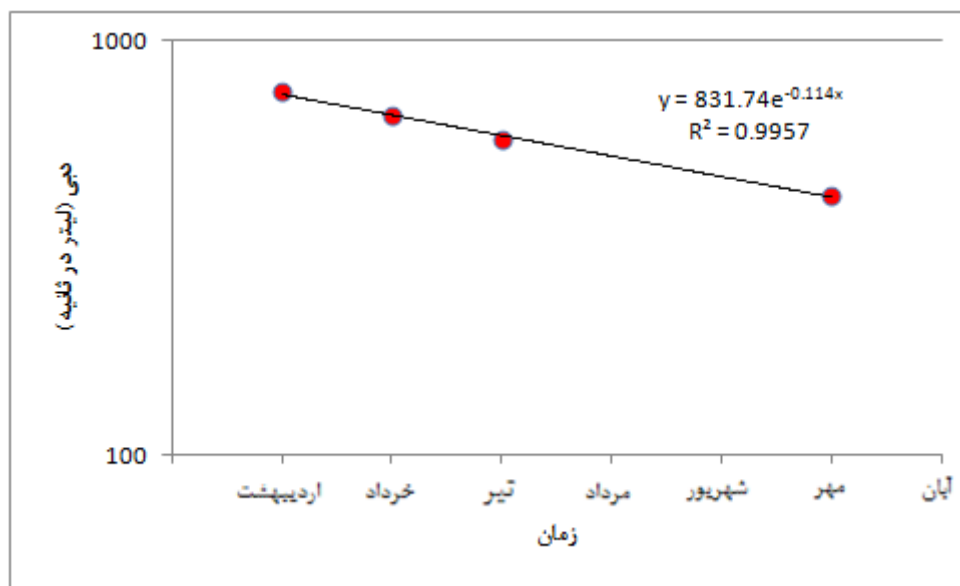
۵-۳- برآورد ضریب آبدهی چشمه به روش مایلت و مانجین

یکی از بخش‌های مهم مطالعات آبخوان‌های کارستی بررسی ضریب آبدهی چشمه و برآورد ذخیره دینامیک آبخوان است. در زیر این مطالعات به دو روش مایلت و مانجین برای چشمه‌علی صورت گرفته است.

۵-۳-۱- برآورد ضریب آبدهی چشمه و ذخیره دینامیک به روش مایلت (Maillet)

مایلت (Maillet, 1902) رابطه خطی بین بار هیدرولیکی و نرخ جریان را بیان داشته است. برای تعیین ضریب آبدهی چشمه به روش مایلت از منحنی فرود (Recession Curve) چشمه استفاده می‌شود. در این منحنی مقادیر دبی در مقیاس لگاریتمی در مقابل زمان ترسیم می‌شود. شیب منحنی ترسیم شده (α) نشان دهنده میزان توانایی آبخوان در ذخیره سازی آب می‌باشد و تابع تخلخل موثر و قابلیت انتقال آبخوان است. منحنی ترسیم شده در آبخوان‌های کارستی با توسعه یافتگی بالا می‌تواند به صورت دو یا سه خط شکسته با شیب‌های متفاوت باشد. کرمی (۱۳۸۳) با توجه به اندازه‌گیری‌های سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳، شیب منحنی

فرود چشمه‌علی را یک خط با شیب برابر با $5/2 \times 10^{-4}$ گزارش کرده است. شکل (۵-۸) منحنی فرود چشمه‌علی از اردیبهشت تا مهر ماه ۱۳۹۰ نشان می‌دهد. شیب منحنی ترسیم شده اندک بوده و برابر با $3/53 \times 10^{-3}$ می‌باشد. مقایسه شیب منحنی‌های فرود در این دو سال آبی، نشان‌دهنده افزایش شیب منحنی در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۹۰ است که به دلیل افزایش دبی و متمایل شدن جریان آب زیرزمینی به جریان‌های مجرای می‌باشد. به طور کلی اینگونه ضریب فرود، بیانگر تغذیه پیوسته و مداوم چشمه با یک رژیم جریان ثابت می‌باشد.



شکل ۵-۸- منحنی فرود چشمه علی در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰

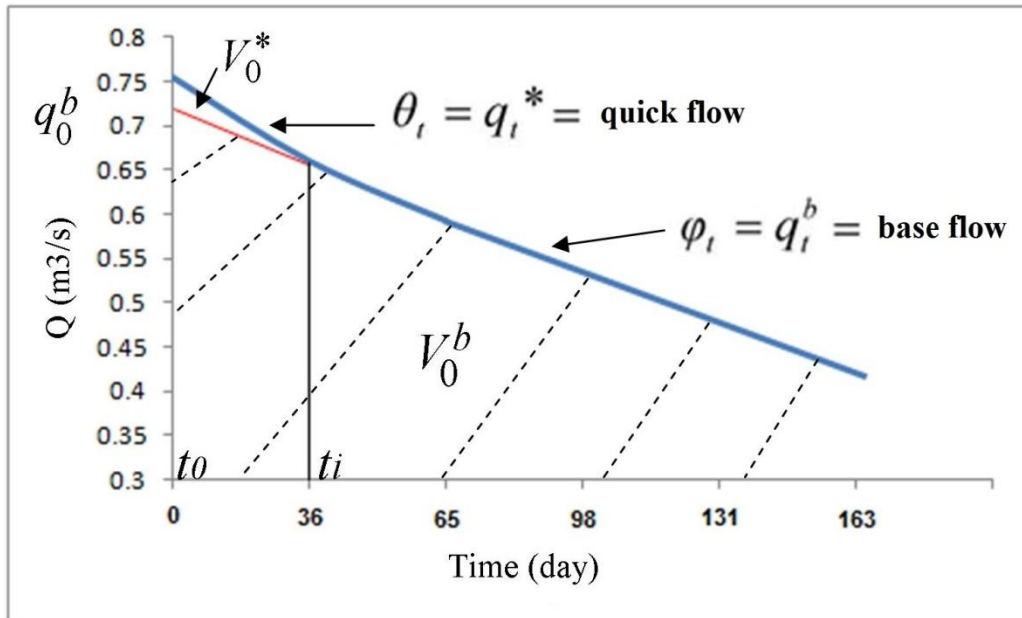
با توجه به شیب منحنی فرود چشمه‌علی و تقسیم بندی درجه کارستی شدن چشمه‌های کارستی (جدول ۲-۲) که توسط مالک (Malik, 2007) ارائه شده است، چشمه علی دارای درجه کارستی شدن و حساسیت ۱ می‌باشد. جریانی که برای اینگونه چشمه‌ها پیش بینی شده جریان خطی (Laminar) می‌باشد. ساده‌ترین حالت محاسبه حجم ذخیره دینامیک مربوط به چشمه‌های است که منحنی فرود آن خطی با یک شیب ثابت باشد. با توجه به شکل (۵-۸) منحنی فرود چشمه‌علی چنین حالتی را دارد، میلانویچ (Milanovic,

1981) رابطه‌ای جهت محاسبه حجم ذخیره دینامیک ارائه داده است. بر اساس رابطه (۳-۶) حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه‌علی برابر ۱۸/۴۸ میلیون مترمکعب برآورد شده است.

۵-۳-۲- بررسی منحنی فرود و حجم ذخیره دینامیک به روش مانجین (MANGIN)

مانجین (Mangin, 1975) منحنی فرود چشمه‌های کارستی را متشکل از جریان سریع و جریان پایه می‌داند. وی اظهار داشت که جریان سریع (غیر خطی) در محیط غیر اشباع و جریان پایه (خطی) در محیط اشباع برقرار است و فرضیه مایلت و وجود رابطه خطی بین بار هیدرولیکی و نرخ جریان را فقط در جریان پایه قبول داشت. جهت ترسیم منحنی فرود در این روش از زمان فروکش هیدروگراف، مقادیر دبی در واحد مترمکعب در برابر زمان ترسیم می‌شود. منحنی ترسیم شده به صورت خطی می‌باشد که شیب آن در زمانی تغییر می‌کند که برابر زمان پایان جریان سریع است. مساحت زیر این ناحیه برابر حجم جریان سریع تخلیه شده از آبخوان می‌باشد. با امتداد دادن شیب قسمت محیط غیر اشباع به محور عمودی، دبی اولیه جریان پایه بدست می‌آید. حجم جریان پایه برابر با مساحت زیر منحنی می‌باشد. شکل (۵-۹) منحنی فرود چشمه‌علی، بر اساس معادلات مانجین را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل t_i زمانی که جریان سریع پایان می‌یابد برابر ۳۶ روز می‌باشد. مقدار Q_0^b دبی اولیه جریان پایه است که برابر ۰/۷۲ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. مقدار μ بر اساس $\mu = 1/t_i$ برابر ۰/۰۲۷ و مقدار ε بر اساس رابطه (۲-۱۴) و روش آزمون و خطا برابر ۰/۰۳۳۵ برآورد می‌شود. مقدار α بر اساس روش مایلت نیز $10^{-3} \times 3/53$ محاسبه شده است. مقدار Q_0^* برابر اختلاف دبی حداکثر از دبی جریان پایه است که برابر ۰/۰۳۵ مترمکعب می‌باشد. بنابراین حجم جریان دینامیک ذخیره شده برای جریان پایه در $t=0$ بر اساس رابطه (۳-۸) برابر با ۱۷/۶۲۳ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. حجم جریان سریع در زمان $t=0$ با استفاده از رابطه (۳-۱۰) حدود ۴۳ هزار مترمکعب برآورد می‌شود. بر اساس رابطه (۲-۱۲) حجم کلی جریان دینامیک ۱۷/۶۶۶ میلیون متر مکعب می‌باشد. بنابراین بر طبق روابط

مانجین ۹۹/۷ درصد از حجم جریان دینامیک مربوط به جریان پایه است که نشان دهنده حاکم بودن جریان افشان موجود در منطقه می‌باشد.



شکل ۵-۹- منحنی فرود چشمه علی بر اساس معادلات مانجین از ششم اردیبهشت تا چهاردهم مهر ماه ۱۳۹۰

۵-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و تجزیه و تحلیل آن‌ها

قبلا اشاره شد که از چشمه‌علی شش مرحله نمونه برداری صورت گرفته و جهت آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شده است. در جدول (۵-۳) نتایج تجزیه شیمیایی این نمونه‌ها همراه با میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات آن‌ها محاسبه شده است. ضریب تغییرات تمامی یون‌ها بسیار پایین و تغییرات بسیار کم غلظت یون‌ها را در طی آمار برداری نشان می‌دهد. درصد خطای آزمایش برای تمامی نمونه‌ها محاسبه و در جدول (۵-۴) آورده شده است. درصد خطا برای همه نمونه‌ها کمتر از ۵ درصد می‌باشد که نشان دهنده دقت قابل قبول آزمایش می‌باشد. نمودار ترسیمی غلظت یون‌ها در مقابل زمان در

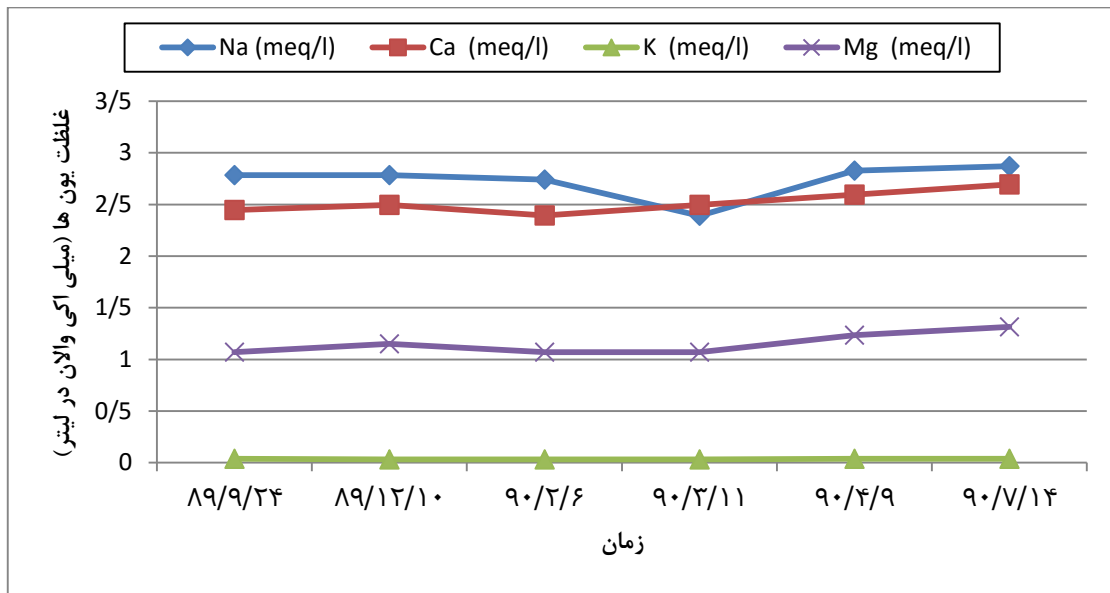
شکل‌های (۵-۱۰ و ۵-۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این دو شکل مشاهده می‌شود که در واقع غلظت یون‌ها دارای مقدار ثابت و بدون تغییری می‌باشد.

جدول ۳-۵ مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده یون‌های اصلی

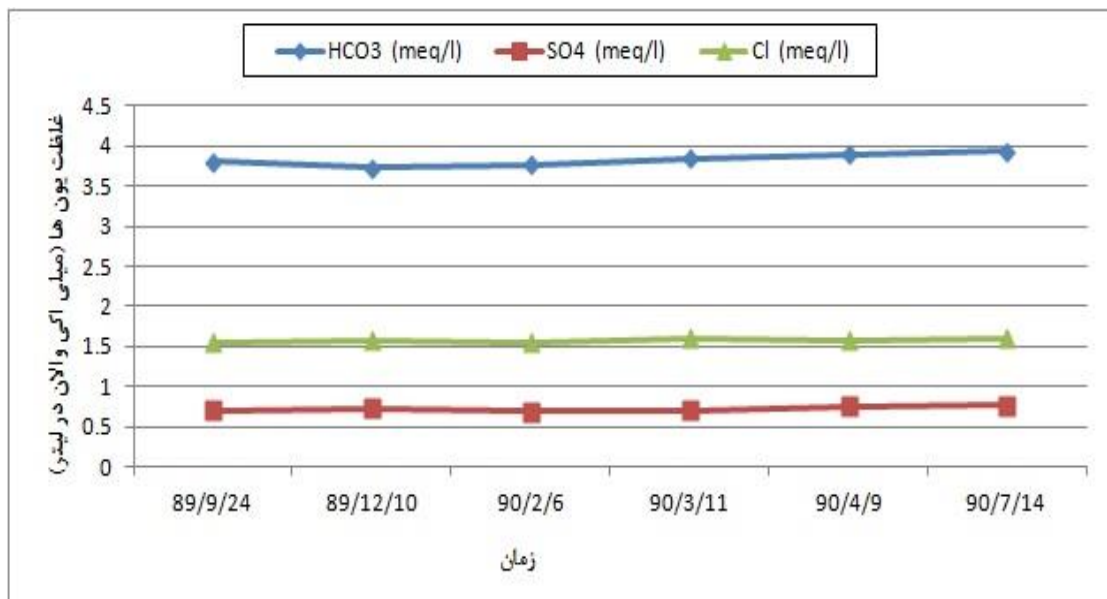
غلظت یون‌ها (mg/l)								تاریخ نمونه‌برداری	
SO_4^{-2}	NO_3^-	HCO_3^-	Cl^-	K^+	Na^+	Mg^{+2}	Ca^{+2}		
۳۴	۷	۲۳۲	۵۵	۱/۵	۶۴	۱۳	۴۹	۱۳۸۹/۹/۲۴	
۳۵	۹	۲۲۸	۵۶	۱/۳	۶۴	۱۴	۵۰	۱۳۸۹/۱۲/۱۰	
۳۳	۷	۲۳۰	۵۵	۱/۲	۶۳	۱۳	۴۸	۱۳۹۰/۲/۶	
۳۴	۸	۲۳۵	۵۷	۱/۲	۵۵	۱۳	۵۰	۱۳۹۰/۳/۱۱	
۳۶	۷	۲۳۸	۵۶	۱/۵	۶۵	۱۵	۵۲	۱۳۹۰/۴/۹	
۳۷	۸	۲۴۵	۵۷	۱/۵	۶۶	۱۶	۵۶	۱۳۹۰/۷/۱۴	
۳۴/۸	۷/۶	۲۳۳/۸	۵۶	۱/۳۶	۶۲/۸	۱۴	۵۰/۵	میانگین	پارامترهای آماری محاسبه شده
۱/۴۸	۰/۸۲	۴/۶۶	۰/۸۹	۰/۱۵	۳/۹۷	۱/۲۶	۲/۱۷	انحراف معیار	
۰/۰۴۲	۰/۱۰۶	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۱۱	۰/۰۶۳	۰/۰۹	۰/۰۴۳	ضریب تغییرات	

جدول ۴-۵ درصد خطای نمونه‌های آزمایشگاه

تاریخ	۱۳۸۹/۹/۱۴	۱۳۸۹/۱۲/۱۰	۱۳۹۰/۲/۶	۱۳۹۰/۳/۱۱	۱۳۹۰/۴/۹	۱۳۹۰/۷/۱۴
درصد خطای آزمایش	۱/۳	۲/۲	۰/۹	-۲/۵	۲/۷	۳/۶



شکل ۵-۱۰- تغییرات زمانی کاتیون‌ها



شکل ۵-۱۱- تغییرات زمانی آنیون‌ها

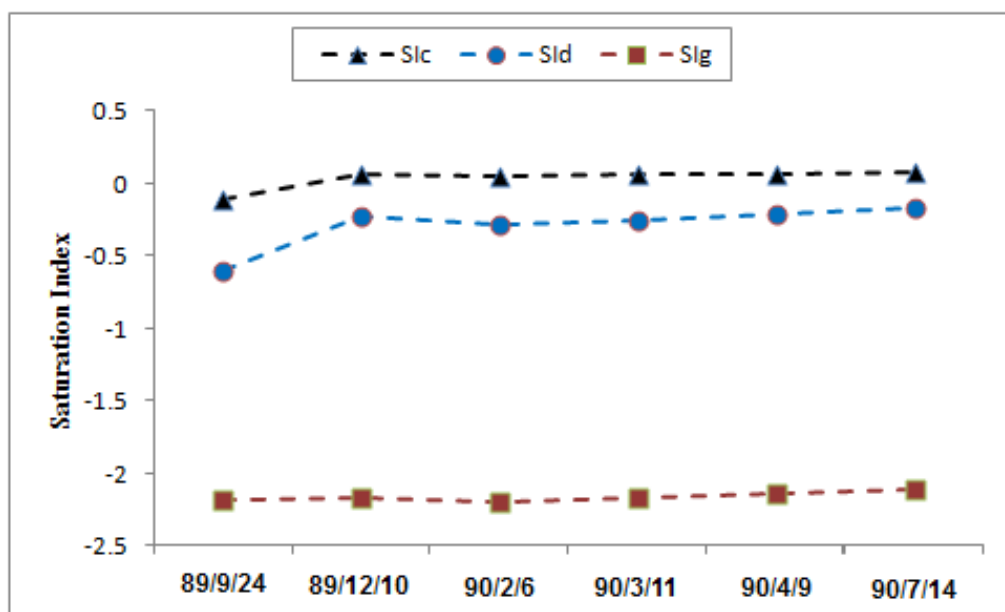
۵-۵- تغییرات زمانی ضرایب اشباع شدگی و سایر پارامترهای محاسبه شده

برخی از پارامترهای آماری و ضرایب اشباع شدگی مربوط به چشمه با استفاده از نرم افزار PHREEQC محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در جدول (۵-۵) آورده شده است. این پارامترها شامل نسبت کلسیم

به منیزیم (Ca/Mg)، کل املاح جامد موجود در آب (TDS)، سختی کل (TH) و شاخص اشباع کانی‌های کلسیت (SI_c)، دولومیت (SI_d) و ژپس (SI_g) می‌باشد. مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات هر کدام از پارامترها محاسبه شده است. نسبت کلسیم به منیزیم در همه نمونه‌ها بیشتر از ۳ است. که آهکی بودن سنگ‌های تشکیل دهنده آبخوان و منشاء گرفتن چشمه از این آهک‌ها را نشان می‌دهد. کل مواد جامد محلول در طی نمونه برداری از ۳۰۳ تا ۳۳۶ میلی گرم در لیتر تغییر داشته است و دارای تغییرات کمی می‌باشد. سختی کل نیز از ۱۷۳ تا ۲۰۰ میلی گرم در لیتر تغییر داشته است. با دقت مشاهده می‌شود که کمترین مقدار سختی کل مربوط به بیشترین دبی خروجی چشمه می‌باشد. در واقع با افزایش دبی و افزایش سرعت جریان مدت زمان اقامت آب در آبخوان کمتر و انحلال کمتری هم صورت گرفته است. شاخص اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس در جدول (۵-۵) مشاهده می‌شود. شاخص اشباع کلسیت در اولین نمونه منفی و زیراشباع بودن آب را نسبت به انحلال کلسیت نشان می‌دهد اما در سایر نمونه‌ها شاخص اشباع کلسیت مثبت و فوق اشباع بودن آب چشمه نسبت به انحلال این کانی را نشان می‌دهد. اما مقادیر شاخص این پارامتر به حدی کم است که امکان ته نشست کلسیت را ممکن نمی‌سازد. بالا بودن ضریب تغییرات شاخص اشباع کلسیت، مربوط به کم بودن مقادیر این پارامتر می‌باشد. با اندک تغییرات در حد ۱ یا ۲ صدم در مقادیر آن، ضریب تغییرات به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. شاخص تغییرات دولومیت و ژپس برای همه نمونه‌ها منفی و زیراشباع بودن آب چشمه را نسبت به این کانی نشان می‌دهد. شکل (۵-۱۲) تغییرات شاخص اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس را در طی دوره نمونه برداری نشان می‌دهد. این شکل بیانگر تغییرات اندک این پارامترها می‌باشد. روند تغییرات شاخص اشباع کلسیت و دولومیت همانند اما شاخص اشباع کلسیت مثبت ولی شاخص اشباع دولومیت منفی و زیراشباع بودن آب را از نظر دولومیت و ژپس نشان می‌دهد.

جدول ۵-۵- محاسبه برخی پارامترهای آماری چشمه‌علی

پارامتر						تاریخ نمونه برداری	
SI _g	SI _d	SI _c	TH (mg/l)	TDS (mg/l)	Ca/Mg (mg/l)		
-۲/۱۸	-۰/۶	-۰/۱۱	۱۷۵/۷	۳۰۷/۷	۳/۷۶۹	۱۳۸۹/۹/۲۴	
-۲/۱۶	-۰/۲۳	۰/۰۶	۱۸۲/۳	۳۱۶/۸	۳/۵۷۱	۱۳۸۹/۱۲/۱۰	
-۲/۲	-۰/۲۸	۰/۰۵	۱۷۳/۲	۳۰۳/۵	۳/۶۹۲	۱۳۹۰/۲/۶	
-۲/۱۷	-۰/۲۶	۰/۰۶	۱۷۸/۲	۳۰۳/۹	۳/۸۴۶	۱۳۹۰/۳/۱۱	
-۲/۱۴	-۰/۲۱	۰/۰۶	۱۹۱/۴	۳۲۴/۹	۳/۴۶۷	۱۳۹۰/۴/۹	
-۲/۱۱	-۰/۱۷	۰/۰۸	۲۰۰/۵	۳۳۶/۷	۳/۳۷۵	۱۳۹۰/۷/۱۴	
-۲/۱۶	-۰/۲۹	۰/۰۳	۱۸۳/۵	۳۱۵/۶	۳/۶۲	میانگین	پارامترهای آماری محاسبه شده
۰/۰۳۲	۰/۱۵۵	۰/۰۷	۱۰/۵	۱۳/۲	۰/۱۸۱	انحراف معیار	
-۱/۴۶	-۰/۵۳	۲۱۲	۵/۷	۴/۲	۵	ضریب تغییرات (%)	

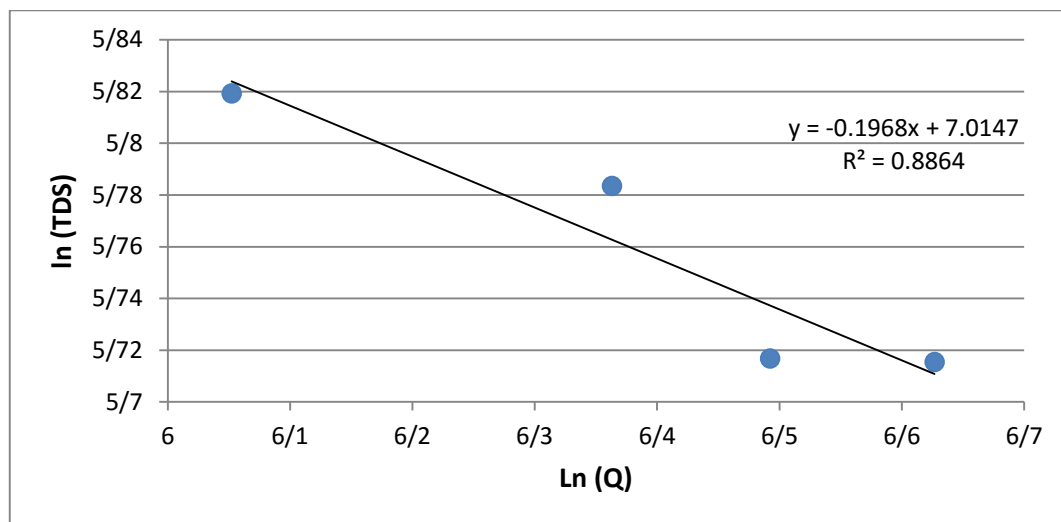


شکل ۵-۱۲- تغییرات شاخص اشباع کلسیت، دولومیت و ژیبس در طی نمونه‌برداری

۵-۶- بررسی ضرایب توسعه درونی کارست به روش هیدروگراف و کموگراف

در مرحله فروکش دبی چشمه‌های کارستی، به دلیل تخلیه شدن آب از مخزن آبخوان، رابطه بین تغییرات غلظت فیزیکی و شیمیایی با تغییرات دبی بیان کننده وضعیت توده داخلی آبخوان می‌باشد (Alessandro Grasso et al. 2003). مهمترین پارامتر که معرف وضعیت انحلال آبخوان باشد تغییرات کل املاح جامد (TDS) می‌باشد. این پارامتر به سهولت و با دقت خوبی قابل اندازه‌گیری است. الکساندرو گراسو و همکاران (Alessandro Grasso et al, 2003) جهت مدل سازی و برآورد شاخص کارستی شدن پنج چشمه موجود در سوئیس از تغییرات کل املاح جامد با دبی در مرحله فروکش چشمه استفاده کرده‌اند. لذا جهت بدست آوردن شاخص کارستی شدن درونی آبخوان چشمه‌علی نیز از دو پارامتر TDS و دبی استفاده شده است. شکل (۵-۱۰) رابطه بین تغییرات TDS در واحد میلی گرم در لیتر با دبی چشمه را از اردیبهشت تا مهر ماه ۱۳۹۰ نشان می‌دهد. شیب منفی این رابطه نشان دهنده ارتباط معکوس تغییرات دبی و کل غلظت املاح در مرحله فروکش چشمه می‌باشد. در واقع با افزایش زمان ماندگاری آب در مرحله فروکش چشمه که همراه با کاهش دبی می‌باشد مقدار تماس آب با بدنه آبخوان بیشتر و در نتیجه انحلال بیشتری صورت می‌گیرد. با توجه به این شکل و رابطه بدست آمده، شیب این خط برابر $0/1968-$ است که برابر α است. عرض از مبدا خط نشان دهنده $\ln(A)$ می‌باشد که برابر $7/01$ است، بنابراین مقدار A برابر با 1107 می‌باشد. ریشه دوم مساحت حوضه آبرگیر چشمه، برابر میانگین طول مجاری کارستی (AFP) آبخوان است که با توجه به مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌علی که 132 کیلومتر مربع می‌باشد، طول مجاری کارستی آبخوان چشمه‌علی برابر $11/49$ کیلومتر برآورد می‌شود. شاخص کارستی شدن درونی آبخوان (AVR) که در واقع نسبت حجم به مساحت داخلی مجاری کارستی بوده و بیان کننده مقدار بازشدگی مجاری کارستی می‌باشد، با استفاده از رابطه (۲-۱۷) محاسبه شده است. شاخص کارستی شدن درونی آبخوان چشمه‌علی 119 سانتی‌متر برآورد شده است که به نسبت مقدار بزرگی است. الکساندرو گراسو و همکاران (Alessandro Grasso et al, 2003) از این مدل‌سازی جهت برآورد شاخص کارستی شدن پنج چشمه استفاده کرده‌اند (شکل ۵-۱۴). لازم به ذکر است که خط چین‌های مورب، مقادیر AVR را به صورت لگاریتمی نشان می‌دهد. چشمه‌های Montant

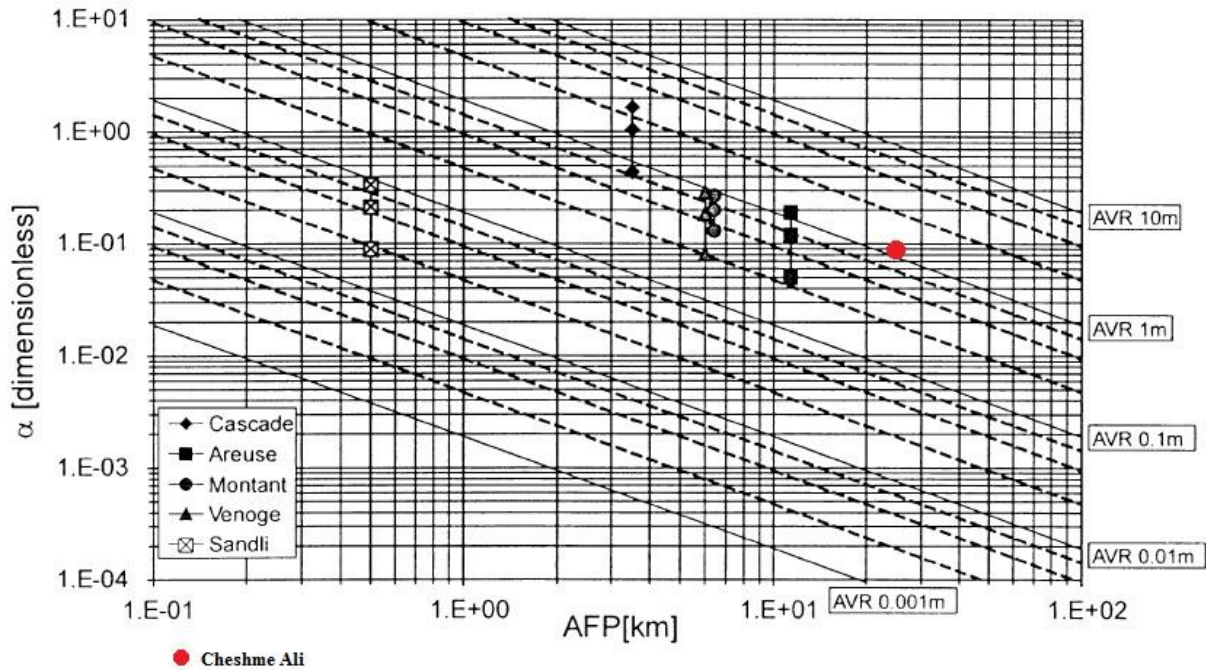
و Venoge بزرگترین چشمه‌های کارستی کوه‌های جورا (Jura) ذکر شده‌اند. چشمه‌های کارستی Cascade و Sandly در کوه‌های Prealpis واقع شده‌اند. برای چشمه‌های Areuse، Cascade و Sandly میانگین طول مجاری کارستی (AFP) ریشه دوم مساحت حوضه آبرگیر برآورد شده است. و دو چشمه دیگر به دلیل مشخص نبودن مساحت حوضه آبرگیر به طریق فاصله طی شده توسط ماده رنگی تعیین شده‌اند. با استفاده از گراف ارائه شده و تعیین مقدار α و AFP به راحتی شاخص کارستی شدن چشمه‌های کارستی را می‌توان بدست آورد. وضعیت توسعه درونی آبخوان چشمه‌علی بر روی گراف موجود در شکل (۵-۱۴) به صورت دایره توپر با رنگ قرمز مشخص شده است.



شکل ۵-۱۳- رابطه بین غلظت کل املاح جامد محلول و دبی چشمه‌علی در مرحله فروکش آن، از ۶ اردیبهشت تا ۱۴ مهر ۱۳۹۰

الکساندرو گراسو و همکاران (Alessandro Grasso et al, 2003) با اندازه‌گیری دراز مدت چشمه‌های مذکور کمترین و بیشترین مقدار α را محاسبه و حداکثر و حداقل مقدار شاخص کارستی شدن درونی آبخوان این چشمه‌ها را برآورد کرده‌اند. و در نهایت بر اساس مدل ارائه شده توسعه درونی چشمه‌های Areuse، Cascade، Venoge و Montant در حد متر با شبکه زهکشی متوسط توسعه یافته (Average developed drainage network) بیان کرده‌اند اما چشمه Sandly دارای شبکه مجاری در حد سانتی‌متر با مجاری کاندویتی باریک یا درزه (Fissure) گزارش شده است. واضح است که گراف مذکور (شکل ۵-۱۴) در مورد

چشمه‌علی دامغان نیز صادق است. چشمه‌علی در مقایسه با چشمه‌های بررسی شده دارای میانگین طول مجاری کارستی بیشتر می‌باشد که به دلیل مساحت زیاد حوضه آبریز این چشمه است. از سوی دیگر شاخص کارستی شدن (AVR) چشمه‌علی در حد متر می‌باشد و شبکه زهکشی مجاری درونی آبخوان آن را می‌توان با توسعه یافتگی متوسط متمایل به زیاد گزارش داد.



شکل ۵-۱۴ مقایسه توسعه درونی آبخوان چشمه‌علی با پنج چشمه مذکور در سوئیس از (Alessandro Grasso et al, 2003)

تغییرات هیدروگراف چشمه نسبت به بارندگی نشان دهنده وجود پاسخ‌های سریع از چشمه در صورت وجود بارندگی‌های قابل توجه می‌باشد. تغییرات هیدروگراف و کموگراف تاییدکننده وجود مجاری کارستی کاندویتی و بزرگ موجود در آبخوان است. از سوی دیگر با توجه به حاکم بودن جریان افشان موجود در آبخوان، می‌توان چشمه‌علی دامغان را یک چشمه افشان کاذب عنوان کرد. که جریان حاکم موجود در آبخوان آن از نوع افشان است اما در نزدیک سطح ایستابی، مجاری کاندویتی بزرگ و توسعه یافته‌ای وجود دارد که می‌تواند در شرایطی که سطح ایستابی بالا باشد جریان‌ها و پاسخ‌های سریعی از رفتار چشمه مشاهده کرد. براساس مدل‌های ارائه شده توسعه داخلی کارست (شکل ۲-۱۲) که توسط فورد (Ford,)

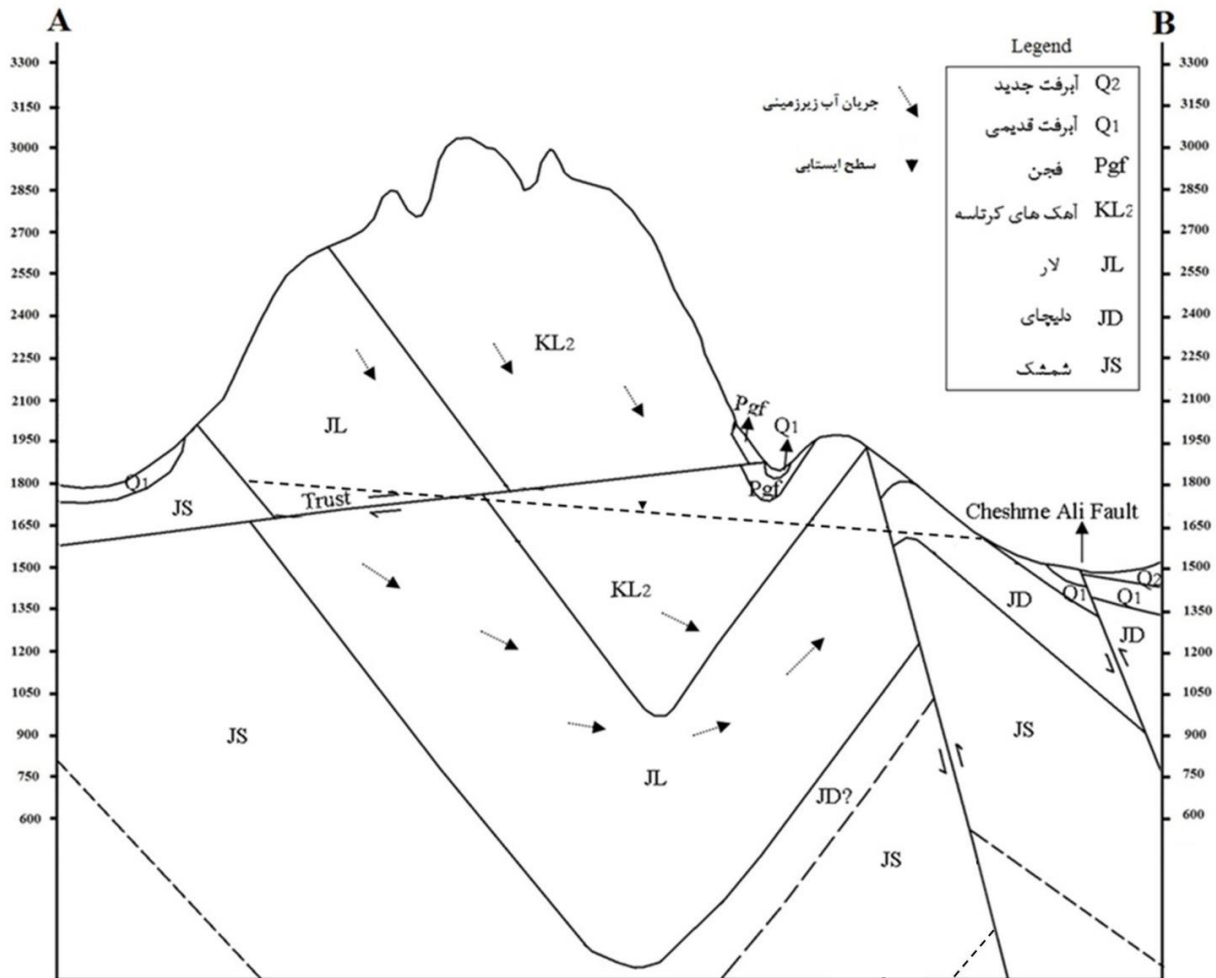
(2003) ارائه و همچنین توسط فلورا و واچر (Flora and Vacher, 2011) نیز گزارش شده است، مدل توسعه کارست آبخوان چشمه‌علی با تئوری توسعه در سطح ایستابی (Water table theory) همخوانی دارد. که بررسی‌های انجام شده هیدروگراف و کموگراف و تغییرات هیدروگراف چشمه نیز مؤید این قضیه می‌باشد.

۵-۷- نقش تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت جریان آب زیرزمینی

اصلی‌ترین فاکتورهای کنترل کننده جریان آب زیرزمینی در مناطق کارستی زمین‌شناسی، تکتونیک و موقعیت سنگ بستر می‌باشد (Ashjari and Raeisi, 2006). جهت بررسی چگونگی تاثیر تکتونیک که شامل چین‌خوردگی و ساختارهای اصلی منطقه می‌باشد و همچنین چگونگی تاثیر چینه‌شناسی در جریان آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بررسی‌های انجام شده است. همانطور که قبلاً گفته شد حوضه آبگیر چشمه‌علی به صورت دو تاقدیس به هم فشرده است که یال شمالی تاقدیس شمالی بر اثر فرسایش از بین رفته است. در این بخش ابتدا روند چین‌خوردگی‌های منطقه و امکان وجود و یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین دو تاقدیس بحث می‌شود. در ادامه سازوکار گسل چشمه‌علی و چگونگی تاثیر آن بر چشمه و کنترل جریان آب‌های زیرزمینی بحث می‌شود. با مشاهدات صحرایی و برداشت‌های صورت گرفته از وضعیت چین‌خوردگی‌های منطقه مشخص شد که عموماً "لایه‌بندی سازندها دارای شیب نسبتاً زیادی (۴۵ درجه) می‌باشند. این شیب لایه‌بندی با توجه به خلوص بالای آهک‌های لار و کرتاسه می‌تواند در جریان آب زیرزمینی نقش مهمی داشته باشد. چین‌خوردگی موجود در سازندهای منطقه که به صورت دو تاقدیس به هم فشرده می‌باشد می‌تواند ارتباط هیدرولیکی بین دو تاقدیس را فراهم سازد. علاوه بر این همگرا شدن شیب‌های لایه‌بندی در حد فاصل دو تاقدیس (به عبارت دیگر ناودیس) در همگرا شدن جریان‌های زیرزمینی و جریان آن در امتداد محور چین‌خوردگی موثر باشد. تاقدیس‌های منطقه با توجه به توانایی بالای خود در نفوذ آب می‌تواند در تغذیه آبخوان نقش مهمی داشته باشد. گسل‌ها با سازوکارهای مختلف می‌توانند به صورت‌های مختلفی در جریان‌های زیرزمینی تاثیرگذار باشند. مهمترین گسل اصلی منطقه که در خروج

چشمه علی تاثیرگذار است گسل چشمه علی می‌باشد. این گسل با توجه به مشاهدات و برداشت‌های صحرایی و همچنین با کمک هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی چگونگی تاثیر آن در جریان آب‌های زیرزمینی و خروج آب از چشمه‌علی بررسی گردید.

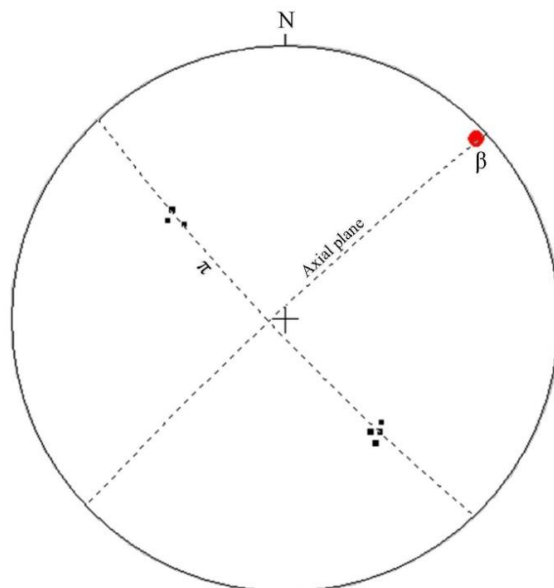
جهت بررسی وضعیت چین خوردگی و لایه بندی موجود در منطقه، مقطع زمین شناسی در طول آبخوان تهیه گردید (شکل ۵-۱۵). مقطع تهیه شده در راستای شمال غرب - جنوب شرق (AB) با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۵-۱) تهیه شد. شیب لایه بندی سازندهای موجود در منطقه نسبتاً زیاد بوده که چین خوردگی موجود در آن به صورت دو تاقدیس متراکم و به هم فشرده می‌باشد. با توجه به مقطع تهیه شده واضح است که آهک‌های لار و کرتاسه اصلی‌ترین سازندهای آبدار آبخوان را می‌سازند. گسل تراستی موجود در شمال غرب منطقه سبب رواندگی تاقدیس شمالی بر روی تاقدیس جنوبی و ارتفاع گرفتن تاقدیس شمالی نسبت به تاقدیس جنوبی شده است. دو گسل دیگر با سازوکار معکوس و شیب زیاد به سمت جنوب شرقی در تاقدیس جنوبی سبب بالا آمدن سازندهای شمشک و دلیچای شده است. برونزد نداشتن سازند دلیچای در تاقدیس شمالی سبب شده است که در مقطع ترسیم شده وجود این سازند در حاله‌ای از ابهام بماند. نبود رخنمونی از سازند دلیچای در نقشه‌های زمینی‌شناسی ممکن است به دلیل شباهت این سازند با آهک‌های لار و همچنین پوشش گیاهی انبوه این منطقه، تفکیک این واحد را در این ناحیه برای زمین شناس سخت کرده باشد. با توجه به مقطع تهیه شده ارتفاع بسیار زیاد تاقدیس شمالی نسبت به قله تاقدیس جنوبی که در حدود ۱۲۰۰ متر می‌باشد، از سوی دیگر متراکم و فشرده‌گی دو تاقدیس به همدیگر و در واقع فاصله کم بین دو تاقدیس و همچنین موقعیت سنگ بستر تاقدیس جنوبی که ماسه سنگ‌های نفوذ ناپذیر شمشک می‌باشد، این امکان از نظر هیدرولیکی مهیا می‌باشد که آب از تاقدیس شمالی به تاقدیس جنوبی جریان داشته باشد. شیب سطح ایستابی ترسیم شده در شکل (۵-۱۵) گویای این مطلب و برقراری ارتباط هیدرولیکی و تغذیه یال جنوبی تاقدیس جنوبی از تاقدیس شمالی است. بنابراین وجود ارتباط هیدرولیکی و برقراری جریان آب زیرزمینی از تاقدیس شمالی به تاقدیس جنوبی نتیجه می‌شود.



شکل ۵-۱۵- مقطع زمین شناسی در راستای AB از سازندهای موجود در حوضه آبگیر (طول ۲/۵ برابر بزرگتر شده است)

داویس و رینولدز (Davis and Reynolds, 1996) بیان نموده‌اند که با ترسیم وضعیت شیب و امتداد یال‌های چین‌خوردگی می‌توان جهت (Trend) و زاویه میل محور چین‌خوردگی را مشخص کرد. با ترسیم استریوگرافیک شیب و امتداد یال‌های چین‌خوردگی بر روی خطوط بزرگ استریونت محل تقاطع صفحات یال‌ها (β) نشان دهنده جهت و زاویه شیب محور چین‌خوردگی است. با برداشت‌های شیب و امتداد یال‌های چین‌خوردگی در حوضه آبگیر چشمه علی و ترسیم آن مشخص شد که محور چین‌خوردگی به سمت شمال شرقی با زاویه میل حدود ۵ درجه می‌باشد (شکل ۵-۱۲). بنابراین علاوه بر وجود امکان ارتباط هیدرولیکی بین دو تاقدیس، همگرا شدن جریان آب‌های زیرزمینی در امتداد ناودیس و پلانج داشتن محور

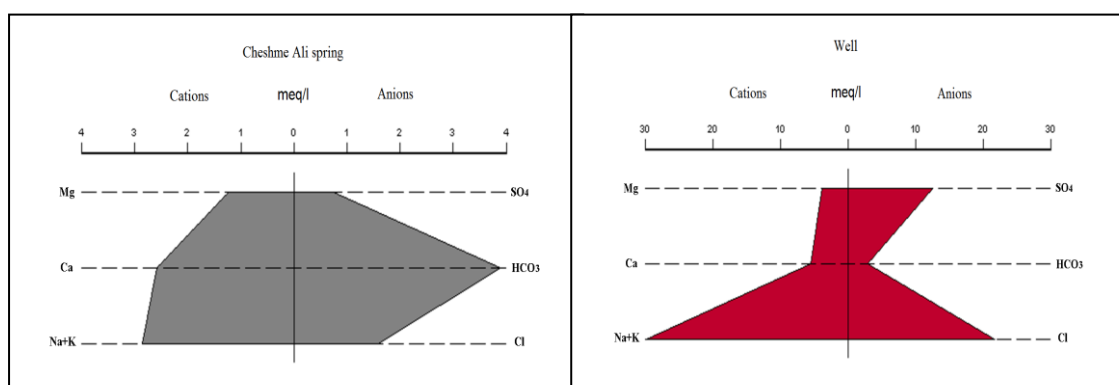
چین خوردگی به سمت شمال شرق در جهت‌گیری جریان آب‌های زیرزمینی به سمت شمال شرق و شرق حوضه می‌تواند تاثیرگذار باشد.



شکل ۵-۱۳- ترسیم استریوگرافیک شیب یال‌های چین خوردگی منطقه

به منظور مشخص کردن، وجود ارتباط هیدرولیکی مابین یال جنوبی تاقدیس جنوبی با رودخانه و آبرفت رخنمون یافته در حد فاصل آن (شکل ۵-۱)، به مطالعه خصوصیات هیدروشیمیایی آب چاه‌های حفر شده در این منطقه پرداخته شد. لازم به ذکر است که گسل چشمه علی در حد فاصل یال جنوبی تاقدیس جنوبی و چاه‌های موجود قرار دارد که توسط آبرفت‌های موجود پوشیده شده است. تعداد چاه‌های محفوره د در امتداد این یال ۲۴ حلقه است (شکل ۵-۱) که با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب همه این چاه‌ها، مشخص شد که از ۲۰۰۰ الی ۳۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر تغییر می‌نمایند، در حالیکه هدایت الکتریکی چشمه تقریباً ۶۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. با نمونه‌گیری و آنالیز شیمیایی آب چشمه و دومین چاه موجود در جنوب غربی چشمه در نهم تیر ماه ۱۳۹۰ مشخص شد که تیپ آب چشمه کربناته (Na-Ca-HCO₃) می‌باشد ولی تیپ آب چاه کلروسولفات (Na-Cl-SO₄) می‌باشد (شکل ۵-۱۶).

تغذیه این چاه‌ها تحت تاثیر رودخانه فصلی آستانه است. در فصول خشک ته‌نشست املاح در بستر رودخانه صورت گرفته و جریان دوباره و تغذیه چاه‌ها از این رودخانه سبب بالا رفتن هدایت الکتریکی آب این چاه‌ها می‌شود. بنابراین بالا بودن هدایت الکتریکی آب چاه‌های موجود و متفاوت بودن تیپ آب آن‌ها تایید کننده تغذیه نشدن این چاه‌ها از یال جنوبی تاقدیس جنوبی چشمه‌علی می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد گسل چشمه‌علی در حد فاصل تاقدیس و چاه‌های موجود واقع شده است بنابراین عاملی که از جریان آب زیرزمینی و تغذیه آبرفت موجود از یال جنوبی تاقدیس جنوبی ممانعت می‌کند گسل چشمه‌علی می‌باشد. بر اساس تقسیم بندی گسل‌ها نسبت به جریان آب زیرزمینی توسط کاستنینگ (Kastning, 1977) گسل چشمه‌علی دامغان یک گسل منفی می‌باشد و نسبت به جریان آب زیرزمینی آب بند است.



شکل ۵-۱۴- مقایسه نتایج آنالیز آب چشمه و چاه موجود در یال جنوبی تاقدیس جنوبی چشمه علی

همانگونه که قبلاً بیان شد یال شمالی تاقدیس شمالی از بین رفته و توسط سازند نفوذناپذیر شمشک محصور شده است. و از جریان آب زیرزمینی به سمت شمال غرب منطقه ممانعت می‌کند بنابراین مرز تماس شمشک با آهک‌های منطقه، بعنوان یکی از مرزهای حوضه آبرگیر چشمه می‌تواند لحاظ گردد. شیب لایه-بندی آهک‌های لار و کرتاسه در جریان آب زیرزمینی در امتداد صفحات لایه‌بندی به سمت جنوب شرقی حوضه موثر می‌باشند. از سوی دیگر محدود شدن جریان آب زیرزمینی در جنوب حوضه آبرگیر توسط گسل

نفوذناپذیر چشمه‌علی و وجود سطح اساس فرسایش در محل و موقعیت چشمه سبب جریان یافتن آب زیرزمینی به سمت جنوب شرقی و موقعیت چشمه می‌شود. بنابراین با توجه به توضیحات بالا چنین نتیجه-گیری می‌شود که آب هر دو تاقدیس حوضه آبرگیر از دو راه احتمالی، الف) حرکت به موازات صفحات لایه-بندی و انتقال به محل پلانچ تاقدیس‌ها در شمال شرق، یا ب) از طریق جریان از تاقدیس شمالی به تاقدیس جنوبی و حرکت به موازات لایه‌بندی و محل خروجی چشمه می‌رسد.

۵-۸- توسعه سطحی و درونی کارست در حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان

توسعه سطحی کارست در حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان با استفاده از ابزارهای GIS و RS و بررسی شاخص کارست شدگی شکستگی‌های منطقه صورت گرفته است. با مدل سازی توسعه کارست منطقه با ابزارهای GIS و RS مشخص شد که حدود ۶۰ درصد از حوضه آبرگیر چشمه دارای توسعه متوسط کارست می‌باشد که بیشتر آهک‌های لار و کرتاسه را شامل می‌شود. بررسی شاخص کارست شدگی شکستگی‌های منطقه مورد مطالعه در چند ایستگاه اندازه‌گیری نشان داده است که این شاخص بر اساس وضعیت کارست-شدگی ارائه شده علوی و چابانی (Aloui and Chaabani, 2006) در بیشتر ایستگاه‌ها در رده خیلی کارستی شده قرار می‌گیرد. با توجه به مشکلات موجود در اندازه‌گیری خصوصیات شکستگی‌ها و نیاز به تعداد بسیار زیاد اندازه‌گیری، و از سوی دیگر متفاوت بودن وضعیت تکتونیکی مناطق مختلف، مقایسه خصوصیات شکستگی‌ها بر اساس تقسیم‌بندی ارائه شده سبب خطا در محاسبات می‌باشد. بنابراین استفاده از GIS و RS به دلیل در نظر گرفتن عوامل و دخیل داشتن لایه‌های موثر بیشتری در توسعه کارست دارای دقت بسیار بالاتری می‌باشد.

مساحت حوضه آبرگیر چشمه با استفاده از بیلان هیدروژئولوژیکی و استفاده از پارامترهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و مرزهای محدود کننده موجود برآورد شده است. نتایج نشان دهنده شکل باریک و کشیده آبخوان چشمه‌علی با مساحت قابل توجهی می‌باشد. توسعه درونی این آبخوان با بررسی ضریب منحنی فرود چشمه، برآورد حجم ذخیره دینامیک و استفاده از روش هیدروگراف و کموگراف بررسی شد. ضریب منحنی فرود چشمه‌علی یک خط مستقیم با شیب بسیار کم $3/53 \times 10^{-3}$ می‌باشد. برآورد حجم ذخیره دینامیک چشمه نشان دهنده این بود که ۹۹/۷ درصد از حجم جریان دینامیک مربوط به جریان پایه است که نشان دهنده حاکم بودن جریان افشان موجود در آبخوان این چشمه می‌باشد. بررسی هیدروگراف چشمه نشان دهنده توانایی پاسخ‌های سریع چشمه به بارندگی‌های یکباره و قابل توجه می‌باشد و نشان دهنده وجود حداقل یک یا چند مجرای بزرگ و کاندویتی در نزدیکی سطح ایستابی آبخوان است که می‌تواند آب را به سرعت از مسیرهای دور زهکشی کرده و به چشمه برساند. بررسی توسعه کارست به روش هیدروگراف و کموگراف نیز نشان‌دهنده توسعه متوسط متمایل به زیاد شبکه زهکشی درونی آبخوان بوده است و مؤید وجود مجاری بزرگ و کاندویتی موجود در آبخوان است. با توجه به نظریه‌های ارائه شده در مورد توسعه درونی آبخوان‌های کارستی که تاکنون سه مدل در این رابطه ارائه شده است که شامل الف) تئوری توسعه زون غیر اشباع (Vadose theory) ب) تئوری توسعه در سطح ایستابی (Water table theory) ج) تئوری توسعه زون‌های عمیق محیط اشباع (Deep phreatic theory) می‌باشد، توسعه درونی آبخوان چشمه‌علی با تئوری توسعه در سطح ایستابی همخوانی دارد که با بالا آمدن سطح ایستابی و ورود آب به یکی از مجاری کاندویتی موجود در این زون، می‌تواند پاسخ‌های سریع در خروجی چشمه مشاهده شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که چشمه‌علی دامغان یک چشمه افشان کاذب می‌باشد.

در نهایت با مطالعات انجام شده وجود ارتباط بین توسعه سطحی و زیرسطحی (درونی) کارست در حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان نتیجه می‌شود. اما گرچه هر دو روش سطحی و زیرسطحی، قابلیت بیان توسعه

کارست را دارند، اما نمی‌توان صرفاً به برداشته‌های سطحی اکتفا کرد و از تجزیه و تحلیل هیدروگراف و کموگراف صرف‌نظر نمود.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادها

در فصل‌های قبل سعی بر آن بود که مطالب به صورت منسجم و حدالامکان همراه با توضیحات کامل ارائه شود و نتیجه‌گیری هر بخش در لابه‌لای توضیحات ارائه شود. در این فصل هدف بر آن است که خلاصه نتایج مطالعات صورت گرفته ارائه شود. لذا ابتدا نتیجه‌گیری‌های صورت گرفته بیان می‌شود و در ادامه جهت مطالعات کامل‌تر پیشنهادات صورت می‌گیرد.

۶-۱- نتیجه‌گیری

(۱) با بررسی زمین‌شناسی منطقه مشخص شد که سازند نفوذناپذیر زیرین شمشک که در نواحی شمالی منطقه رخنمون دارد باعث محدود کردن ارتباط‌های هیدرولیکی با آبخوان‌های زیرین و ممانعت از جریان آب‌های زیرزمینی به سمت نواحی دورتر می‌شود بنابراین مرز سازند شمشک با آهک‌های منطقه یکی از مرزهای حوضه آبگیر چشمه می‌باشد.

(۲) از نظر چین خوردگی، آبخوان چشمه‌علی به صورت دو تاقدیس به هم فشرده و متراکم می‌باشد که یال شمالی تاقدیس شمالی بر اثر فرسایش از بین رفته است. بنابراین می‌توان از نظر زمین‌شناسی ساختمانی و هیدروژئولوژیکی و فعال بودن تکتونیک منطقه، آبخوان چشمه‌علی را از نوع ژئوسینکلینالی عنوان کرد.

۳) جهت بررسی و مدل سازی توسعه سطحی کارست آبخوان چشمه علی، با جمع آوری داده های مورد نیاز از منابع مختلف و تشکیل لایه های اطلاعاتی موثر در توسعه کارست در نرم افزار GIS به مدل سازی توسعه سطحی کارست این آبخوان اقدام گردید. مطالعات نشان می دهد که ۱۸/۱۳ درصد از حوضه آبرگیر چشمه، مناطق با توسعه کم کارست، ۶۰/۴۵ درصد مناطق با توسعه متوسط کارست، ۱۸/۷۳ درصد مناطق با توسعه زیاد کارست و تنها ۲/۶۷ درصد از حوضه آبرگیر را نواحی با توسعه خیلی زیاد کارست تشکیل می دهد. بنابراین واضح است که بیشترین درصد مساحت حوضه آبرگیر این چشمه، نواحی با توسعه کارست متوسط تشکیل داده است.

۴) شاخص کارست شدگی شکستگی های اندازه گیری شده در چندین ایستگاه اندازه گیری در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان نشان دهنده رده خیلی کارستی شده این شکستگی ها بوده است. معیار ارزیابی، رده بندی شاخص کارست شدگی شکستگی ها که توسط علوی و چابانی (Aloui and Chaabani, 2006) برای منطقه کارستی جبل فریانا (Jebel Feriana) در تونس ارائه شده است، می باشد. از آنجا که شکستگی های هر منطقه محلی و تابع تکتونیک آن منطقه می باشد، رده بندی توسعه شکستگی های کارست بر اساس رده بندی نواحی دیگر صحیح نمی باشد.

۵) برآورد و تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه علی به روش بیلان هیدرژئولوژیکی و پارامترهای زمین شناسی نشان دهنده شکل باریک و کشیده با مساحت قابل توجه حوضه آبرگیر این چشمه می باشد. شکل باریک و کشیده این آبخوان در تغذیه مداوم و پیوسته چشمه تاثیرگذار است.

۶) با بررسی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی و تغییرپذیری اندک ویژگی های چشمه مشخص شد که سیستم جریان حاکم در این آبخوان، از نوع جریان افشان است.

(۷) با برآورد حجم ذخیره دینامیک به روش مایلت مشخص شد که آبخوان چشمه‌علی دارای حجم ۱۸/۴۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. برآورد حجم ذخیره دینامیک به روش مانجین نیز نشان داد که حجم کلی ذخیره دینامیک این آبخوان ۱۷/۶۶ میلیون مترمکعب می‌باشد که ۹۹/۷ درصد از این حجم مربوط به جریان پایه است. بنابراین مؤید حاکم بودن سیستم جریان افشان موجود در آبخوان است.

(۸) بررسی هیدروگراف چشمه در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ حاکی از افزایش قابل توجه دبی چشمه از ۴۴۰ لیتر در ثانیه در اسفند ماه ۱۳۸۹ به ۷۵۵ لیتر در ثانیه در اردیبهشت ماه ۱۳۹۰ بوده است. با بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که این افزایش دبی به دلیل بارندگی‌های متوالی صورت گرفته در سه روز بیستم تا بیست و سوم اسفند ماه ۱۳۸۹ بوده است. مطالعات حاکی از وجود حداقل یک یا چند مجرای کاندویتی در نزدیک سطح ایستابی است. که با افزایش سطح آب زیرزمینی و ورود آب به یکی از مجاری کاندویتی می‌تواند از مناطق دور به چشمه زهکشی شده و پاسخ‌های سریع از چشمه مشاهده گردد.

(۹) بررسی توسعه درونی آبخوان چشمه‌علی به روش هیدروگراف و کموگراف نشان داده است که شاخص کارست شدگی درونی آبخوان (AVR) مجاری زهکشی آن در حد متر و توسعه خوب مجاری داخلی آبخوان می‌باشد. بنابراین این روش نیز مؤید وجود مجاری بزرگ و کاندویتی موجود در آبخوان است.

(۱۰) بنابر نتایج بدست آمده مدل توسعه داخلی آبخوان چشمه‌علی دامغان با تئوری توسعه در زون سطح ایستابی (Watertable theory) همخوانی دارد.

(۱۱) با بررسی تاثیر تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت‌یابی جریان آب زیرزمینی امکان ارتباط هیدرولیکی از تاقدیس شمالی به تاقدیس جنوبی مهیا می‌باشد. عدم ارتباط هیدرولیکی یال جنوبی تاقدیس جنوبی با آبرفت موجود در منطقه با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی چاه‌های موجود اثبات گردید. عاملی که از وجود ارتباط هیدرولیکی ممانعت می‌کند گسل چشمه‌علی می‌باشد که در حدواسط تاقدیس جنوبی با آبرفت‌های منطقه می‌باشد. بنابراین آب هر دو تاقدیس از دو راه احتمالی، الف) حرکت به موازات صفحات لایه‌بندی و انتقال به محل پلانج تاقدیس‌ها در شمال شرق، یا ب) از طریق جریان از تاقدیس شمالی به تاقدیس جنوبی و حرکت به موازات لایه‌بندی و محل خروجی چشمه می‌رسد

(۱۲) گسل چشمه‌علی دامغان یک گسل آوند بوده و نسبت به جریان آب زیرزمینی نفوذناپذیر می‌باشد.

(۱۳) بنابر نتایج بدست آمده ارتباط منطقی توسعه سطحی و زیرسطحی آبخوان چشمه‌علی دامغان نتیجه می‌شود.

۶-۲- پیشنهادهای

(۱) اندازه‌گیری هفتگی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه جهت شناخت بیشتر توده آبخوان و رفتارهای ممکن موجود در آبخوان این چشمه صورت بگیرد.

(۲) جهت تکمیل مطالعات صورت گرفته آزمایش ردیابی انجام شود.

منابع فارسی:

- آقاباتی، س، ع؛ (۱۳۸۵). زمین شناسی ایران، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ دوم، ۵۸۷ ص

- امیدی، پ؛ (۱۳۸۰). تحلیل ساختاری و دینامیکی تفصیلی زون‌های گسلی در حاشیه جنوبی البرز خاوری (گستره سمنان - دامغان)، رساله دوره دکتری زمین‌شناسی (تکتونیک)، دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس

- بربریان، م؛ (۱۳۶۴). بررسی و پژوهش نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه-گسلش در ناحیه باختر دامغان، مهندسين مشاور کوبانکاو، سازمان آب منطقه‌ای سمنان

- بربریان، م؛ قرشی، م؛ طالبیان، م؛ شجاع طاهری، ج؛ (۱۳۷۵). پژوهش و بررسی نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر گسلش در گستره سمنان (گزارش شماره ۶۳ سازمان زمین‌شناسی کشور)، ۲۶۶ ص

- بربریان، م؛ قرشی، م؛ (۱۳۶۷). بررسی لرزه‌زمین‌ساختی و مهندسی زمین لرزه طرح سد مخزنی فجن شاهرود. امور منابع آب استان سمنان، دفتر مشاورین لار، ۲۳۹ ص

- پایگاه ملی داده های علوم زمین، جایگاه و ویژگی های استان سمنان
(<http://www.ngdir.ir/States/PStateComment.asp?PStateCode=24&PID=67>)

- خدائی، ک؛ (۱۳۷۹). نقش نمایانگرهای آبهای زیرزمینی در شناسایی منابع آب کارستی حوضه نمونه ارومیه با استفاده از GIS. پایان نامه دانشکده علوم زمین، گروه زمین شناسی آبشناسی، دانشگاه شهید

بهشتی

- خدری، ا؛ (۱۳۹۰). تلفیق اطلاعات سنجش از دور و GIS برای پیشرفت توسعه کارست با تحلیل هیدروگراف چشمه‌ها در تاقدیس پیون. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد آشناسی، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی دانشگاه تربیت معلم

- حسینی شفیعی، ل؛ (۱۳۸۲). پهنه‌بندی نفوذپذیری نسبی طاقدیس کارستی پودنو در استان فارس با استفاده از داده‌های دورسنجی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد آشناسی، گروه علوم زمین، دانشگاه شیراز

- دشتی برمکی، م؛ (۱۳۸۹). پتانسیل یابی منابع آب کارست با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS در تاقدیس‌های دشتک و شاه‌نشین. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد آشناسی، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی دانشگاه تربیت معلم

- رضایی توابع، ک؛ ملکیان، آ؛ افضل‌ی، ع؛ (۱۳۸۹)، مطالعه هیدروبیولوژی و تعیین وضعیت ساپروبی رودخانه چشمه‌علی دامغان. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، ص ۸۱-

۹۲

- زبیری، م؛ مجد، ع؛ (۱۳۷۸). آشنایی با فن سنجش از دور و کاربرد در منابع طبیعی. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، شماره ۲۳۱۵

- سامانی، ن؛ 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 زمین-شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۲۰۴-۱۹۲

- سعیدی، م؛ اکبر پور، م؛ ر؛ (۱۳۷۱). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر، سازمان زمین‌شناسی کشور

- شکری، م، ع؛ قرشی، م؛ نظری، ح؛ سلامتی، ر؛ طالبیان، م؛ ریتز، ژ؛ ف؛ محمدخانی، ح؛ شاه پسندزاده، م؛ (۱۳۸۷). داده‌های مقدماتی از حفاری‌های دیرینه لرزه‌شناسی بر روی گسل آستانه. فصلنامه علمی -

پژوهشی علوم زمین، سال هجدهم، شماره ۷۰، ص ۹۳-۸۴

- عبادیان، س؛ (۱۳۸۱). ارزیابی عوامل موثر در پتانسیل آبهای کارستی کوههای گر و برم فیروز در استان فارس با استفاده از اطلاعات رقمی ماهواره‌ای و روش‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). پایان نامه کارشناسی ارشد آبشناسی، گروه علوم زمین، دانشگاه شیراز

- عباسی، م، ر؛ شبانیان بروجنی، ا؛ (۱۳۸۴). تعیین وضعیت تنش به روش برگشتی از صفحه‌های گسلی لبه جنوبی البرز مرکزی. فصلنامه علوم زمین سال چهاردهم، شماره ۵۵، ص ۲ تا ۱۷

- علوی، م؛ صالحی راد، ر؛ (۱۹۷۵). نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دامغان. سازمان زمین شناسی کشور

- علیزاده، ا؛ (۱۳۸۷). اصول هیدروژئولوژی کاربردی، انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ بیست و پنجم، ۸۷۲ ص

- غیثی، ح؛ (۱۳۸۷). بررسی عوامل موثر در توسعه کارست در پهنه‌های کارستی زاگرس با استفاده از اطلاعات رقمی سنجش از دور و GIS. پایان نامه کارشناسی ارشد آبشناسی، گروه علوم زمین، دانشگاه شیراز

- کاظمی، ر؛ غیومیان، ج؛ جلالی، ن؛ (۱۳۸۵). بررسی نقش عوامل ساختاری در فراوانی منابع آب کارستی لار با استفاده از سنجش از دور و GIS. پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی شماره ۷۳، ص ۴۱-۳۳

- کرمی، غ؛ (۱۳۷۲). بررسی رابطه بین عوامل موثر بر نفوذ آب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی کوه‌های گر و برم فیروز، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد آبشناسی، گروه علوم زمین، دانشگاه شیراز

- کرمی، غ؛ (۱۳۸۳). بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی چشمه علی دامغان. طرح پژوهشی با کد ۲۱۰۷، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۴۷ ص

- کریمی وردنجانی، ح؛ (۱۳۸۹). هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها). انتشارات ارم شیراز، ۳۹۹ ص
- کلانتری، ن؛ کشاورزی، م، ر؛ چرچی، ع؛ (۱۳۸۸). عوامل موثر در ظهور چشمه‌های حوضه‌ی آبریز دشت ایذه. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی سال ۵، شماره ۲: ۱۴۷-۱۳۵
- لشگری پور، م؛ میرزایی، ا؛ کابلی، پ؛ (۱۳۸۷). تشکیل غار و بررسی آبخوان‌های کارستی (قسمت دوم).
منبع اطلاعاتی gsim.blogfa.com
- مقدسی، ص؛ (۱۳۸۲). پترولوژی، پتروژنز و جایگاه چینه نگاری سنگ‌های آتشفشانی ژوراسیک در زون البرز شرقی. پایان نامه کارشناسی ارشد پترولوژی، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود
- مرادی، ص؛ رضایی، م؛ پرهت، ج؛ (۱۳۸۹). بررسی تاثیر عوامل مختلف در توسعه کارست پهنه‌های کارستی زاگرس. بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین
- ملکی، ا؛ شوهانی، د؛ علایی طالقانی، م؛ (۱۳۸۷). پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه. فصلنامه مدرس علوم انسانی، دوره ۱۳، شماره ۱، ص ۲۹۵-۲۷۱
- ملکی، ا؛ (۱۳۸۸). شناسایی مناطق مساعد آلودگی آب‌های زیرزمینی به کمک پهنه‌بندی تحول کارست با GIS (مطالعه موردی استان کرمانشاه). فصلنامه علوم زمین، سال هجدهم شماره ۷۲: ۳۲-۲۵
- مینویی، ا؛ (۱۳۸۸). نقش شکستگی‌ها در جریان آب زیرزمینی در منطقه کارستی کوه‌های شاهو، کردستان. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد آبشناسی، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ناصری، ح، ر؛ علیجانی، ف؛ میرزایی، س، ح؛ (۱۳۸۷). توموگرافی ژئوالکتریک کارست تاقدیس آسماری (جنوب شرق مسجد سلیمان). مجله علوم دانشگاه شهید چمران، شماره ۱۹، قسمت ب، ص ۱۱۰-۱۰۰

- وزارت نیرو؛ (۱۳۷۸). گزارش آماربرداری رودخانه‌ها و انهار (شهمیرزاد- مجن- چشمه علی دامغان)، امور آب شهرستان دامغان

- وزارت نیرو (مهندسين مشاور طرح آبريز)؛ (۱۳۸۸). مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی دشت دامغان (پنج جلد)، امور آب شهرستان دامغان

- هاشمی، س، ن؛ تقی پور، ن؛ قوشه ای، م؛ زارع رئیس آبادی، ح؛ (۱۳۸۹). بررسی نقش گسل‌های اصلی در کنترل فراوانی منابع آب زیرزمینی استان سمنان، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، ۲۳-۲۱ اردیبهشت ماه، کرمانشاه

References

- Alessandro Grasso, D. Pierr-Yves Jeannin. Francois Zwahlen. (2003) "A deterministic Approach to the coupled analysis of karst springs hydrographs and chemographs". Hydrogeology Journal, 271: 65-76
- Aloui, T. Chabbani, F. (2006) "Influence of fractures and karstification on development of a quarry at Jebel Feriana, Tunisia". Bull Eng Geol Environ, 66: 345-351
- Ashjari, J. (2006) "Classification of Zagros karstic aquifer based on general direction of groundwater flow and physic-chemical properties" Ph.D. Thesis in geology, Faculty of Science, Shiraz University.
- Ashjari, J. Raeisi, E. (2006) "Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran" Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 68, no. 3, p. 118-129
- Atkinson, T, C. (1977) "Diffuse flow and conduit flow". J. Hydrol. 35:93-110
- Baalousha, H. (2006) "Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC" Environ Geol 50: 405-414
- Babiker, M. Gudmundsson, A. (2004) "The effect of dykes and faults on ground water flow in an arid land, the Red Sea Hills, Sudan" Hydrogeology Journal, Vol. 297, pp. 256-273
- Bonacci, O. (1987) "Karst hydrogeology and water resource- past, present and future". Karst hydrogeology and water resource, IAHS publ. no. 164, pp. 205-213

- Bonacci O. (1990) “*Specific hydrological characteristics of the karst system*”, Proc. of the 3rd int. Iranian congress of civil Eng. Vol. 2, pp.175-196
- Bonacci, O. (1993) “*Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers*”. Hydrogeological sciences- journal, des science hydrologiques, 38,1,2, pp. 51-62
- Bonacci, O. Zivaljevic, R. (1993) “*Hydrological explanation of the flow in karst. Example of the Crnojevica spring*” Hydrology Journal. 146, 405-419
- Darnault, C, J, G. (2008) “*Karst Aquifer: Hydrogeology and Exploitation*”. Chapter 10, Springer Science+Business Media B.V
- Davis, G, H. Reynolds, S, J. (1996) “*Structural geology of rock and regions*”, second edition, John Wiley & Sons. Inc, 792 p
- Dreybrod, W. Gabrovsek, F. (2010) “*A model of karstification in extended limestone plains by mixing corrosion*” pp, 457-462, In: “*Advances in research in karst media*”, B. Andreo et al.(Eds.), Environmental Earth Sciences
- Florea, Lee, J. Vacher, H, Len. (2011) “*Communication and forestructures at the geological intersection of cave and subsurface water flow*” Hermeneutics and Parochialism, Geology Faculty Publications. Earth Science History, Vol, 30, No. 1, pp.85-105
- Ford, D., Williams, P. (2007) “*Karst Hydrogeology and Geomorphology*”. second edition, p: 553
- Ford, D, C. (2003) “*Perspective in karst hydrogeology and cavern genesis*” Speleogenesis and Evaluation of Karst Aquifers, the Virtual Scientific Journal, 1 (1), p:1-12
- Goldsheider, N. Drew, D. (2007) “*Methods in karst hydrogeology*” International Association of Hydrogeologists, 264 p
- Gregory, A, Shofner. Hugh, H, Mills. Jason, E, Duke. (2001) “*A simple map index of karstification and its relationship to sinkhole and cave distribution in Tennessee*” Journal of Karst and Cave Studies 63(2): 67-75
- Gudmundsson, A. (2000) “*Active fault zones and ground water flow*” Geophys. Res. Lett. Vol 27, 2993-2996
- Hung, L, Q. Dinh, N. Q. Batelaan, O. Tam, V, T. Lagrou, D. (2001) “*Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi Catchment (Son La- NW Vietnam)*”. Journal of Cave and Karst Studies 64(1): 23-33
- Karami, G. H. (2002) “*Assessment of heterogeneity and flow system in karstic aquifers using pumping test data*” Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering and Geosciences University of Newcastle Upon Tyne.

- Karimi, H. Raeisi, E. Bakalowicz, M. (2004) “*Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin, northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach*”. Hydrogeology Journal, 13:787-799
- Kazemi, R. Porhemmat, J. Kheirkhah, M. (2009) “*Investigation of lineaments related to ground water occurrence in a karstic area: a case study in Lar catchment, Iran*” Research Journal of Environment Sciences, 3(3): 367-375
- Kastning, E. H. (1977) “*Faults as positive and negative influence on groundwater flow and conduit enlargement*”. In Dilamarter, R. R.; Csallany, S.C. (eds.). Hydrologic problems in karst regions, Bowling Green, Ky, W. Ky. Univ. 482 p.
- Kumar, G,N, P. Srinivas, P. Chandra, K, J. Sujatha, P. (2010) “ *Delineation of groundwater potential zones using Remote sensing and techniques: A case study of Kurmapalli Vagu Basin in Andhra Pradesh, India*” International Journal of water Resources and Environmental Engineering, Vol. 2(3), pp. 70-78
- Malik, P. (2007) “*Assessment of regional karstification degree and groundwater sensitivity to pollution using hydrograph analysis in the Velka Fatra Mountains, Slovakia*”. Environ Geol 51: 707-711
- Malik, P. Vojtkova, S. (2010) “*Use of combined recession curves analyses of neighbouring karstic springs to reveal karstification degree of groundwater springing routes*” pp, 101-106, In: “Advances in research in karst media”, B. Andreo et al.(Eds.), Environmental Earth Sciences
- Mayer, J, R.; Sharp, J, M. (1998) “*Fracture control of regional ground water flow in a carbonate aquifer in a semi-arid region*” Geol. Soc. Am. Bull. Vol. 110, pp. 269-283
- Mohammadi, Z. Raeisi, E. Zare, M. (2007), “*A dye-tracing test as an aid to studying karst development at an artesian limestone aquifer: Zagros Zone, Iran*”. Environ Geol, Vol 52:587-594
- Milanovic, P. (1981) “*Karst Hydrogeology*” Water Resources Pubns, 434p
- Pathak, D, R. Hiratsuka, A. Awata, I. Chen, L. (2009) “*Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer of Kathmandu valley using GIS-based DRASTIC model*” Environ Geol, Vol. 57:1569-1578
- Pradeep Kumar, G, N. Srinivas, P. Jaya Chandra, K. Sujatha, P. (2010) “*Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques: A case study of Kurmapalli Vagu Basin in Andhra Pradesh, India*” International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, Vol. 2(3), pp. 70-78
- Qari, M, H, T. (2010) “*Lineament extraction from multi-resolution satellite imagery: a pilot study on Wadi Bani Malik, Jeddah, Kingdom of Saudi Arabia*”. Arab J Geosci, published online: 27 January 2010, DOI 10.1007/s12517-009-0116-3

- Raesi E. (2002) “*Carbonate karst caves in Iran*”. In: Kranjc A (ed) *Evolution of Karst: from prekarst to cessation*. Ljubljana-postojna, P. 339-344
- Saidi, S. Bouri, S. Ben Dhia, H. (2010) “*Groundwater vulnerability and risk mapping of the Hjebl-jelma aquifer (Central Tunisia) using a GIS-based DRASTIC model*” *Environ Earth Sci* Vol. 59:1579-1588
- Sener, E. Davraz, A. Ozcelik, M. (2005) “*An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in burdur, Turkey*” *Hydrogeology Journal* 13:826-834
- Sener, E. Sener, S. Davraz, A. (2009) “*Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu basin (Isparta, Turkey)*” *Hydrogeology Journal*, Vol. 17:2023-2035
- Shaban, A. Khawlie, M. Abdallah, C. (2006) “*Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon*” *Hydrogeology Journal*, Vol. 14:433-443
- Shaban, A. Khawlie, M. Abdallah, C. Faour, G. (2005) “*Geologic control of submarine groundwater discharge: application of remote sensing to north Lebanon*” *Environ Geol*, Vol. 47:512-522
- Shamsi, U, M. (2005) “*GIS Application for water, wastewater and stormwater systems*”, a CRC press, 453 p
- Singhal, B, B, S; Gupta, R,P. (2010) “*Applied Hydrogeology of fractured Rocks*” second edition, Springer Science, 459 p
- Solomon, S; Quiel, F. (2006) “*Groundwater study using remote sensing and geographic information system (GIS) in the central highlands of Eritrea*” *Hydrogeology Journal*, Vol. 14:1029-1041
- White, W, B. (1998) “*Groundwater flow in karstic aquifers*”. In Delleur, J. W. (Ed.), *The Handbook of Groundwater Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 1-36
- White, W, B. (2002), “*Karst hydrology: recent developments and open questions*” *Engineering Geology*, Vol. 65:85-105
- White, W, B. (2003) “*Conceptual models for karstic aquifer, Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifer*” *the virtual scientific Journal*, Vol. 1, pp 1-6
- White, W, B. White, E, L. (2005) “*Groundwater flux distribution between matrix, fracture, and conduits: constraints on modeling*” *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifer*, 3(2), p.1-6
- Worthington, S, R, H. Ford, D, C. Davies, G. J. (2000) “*Matrix, fracture and channel components of storage and flow in a Paleozoic limestone aquifer*” In *Groundwater Flow and*

Contaminant Transport in Carbonate Aquifers, I.D. Sasowsky and C.M. Wicks, Eds., A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 113-128

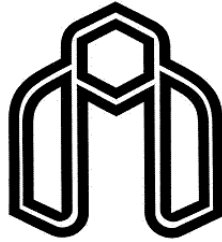
- Weng, Q. (2010) “*Remote sensing and GIS integration theories, methods and applications*” McGraw-Hill Companies Inc., 433 p

- Yeh, H, F. Lee, C, H. Hsu, K, C. Chang, P, H. (2009) “*GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone*”. *Environ Geol* Vol. 58:185-195

Abstract

Several factors control karst development including climatology, geology and tectonic of land terrains. Assessment of karstification mainly is based on the personal judgment and observations. Recently, researchers have made efforts to find a logical and scientific method to assess it numerically. New methods are classified into two main groups. First group is based on the surface evaluation of solution features such as frequency and density of sinkholes and so on. Second group is based on the study of hydrograph and chemograph of karstic springs. The objective of this study is to compare results of two mentioned groups in catchment area of Cheshmeh-ali Spring in Damghan. The study area lies in 32kilometrs in north of Damghan City. The Geographical Information System, Remote Sensing, and field measurements of fractures density and frequency in several stations have been used to determine surface karst development. Monthly spring discharge rate and physicochemical parameters of spring, in 2003-2004 were used to determine the subsurface karstification rate. Furthermore, monthly measurements of discharge rate and chemical parameter were carried out in 2010-2011. GIS study results were verified by field studies. The results show that the karst development rate is average in most parts of the spring catchment area. The spring hydrograph interpretation indicate the pseudo-diffuse flow system in the region. The spring hydrograph response to rainfall shows the impact of one or more conduits in water level fluctuation zone of aquifer. The evidence is rapid response of spring to high rate of rainfall. The chemograph and springs hydrograph confirm the karstification of aquifer. Finally, it has been concluded that although both methods are able to demonstrate of the karstification process in an aquifer, it is not logical to discard the hydrograph and chemograph analysis.

Keyword: Surface karst development, Subsurface karst development, GIS, RS, Hydrograph and Chemograph, Damghan's Cheshme-ali



Shahrood University of Technology
Faculty of Earth Sciences

**Assessment of karst development in Damghan's
Cheshmeh-Ali basin by compiling of hydrogeological
studies, GIS and RS**

Mohammad Shokri

Supervisors:

Dr. G.H. Karami
Dr. J. Ashjari

Jan 2012