جغرافیا و توسعه شماره ۴۴ پاییز ۱۳۹۵
وصول مقاله : ۱۳۹۴/۰۷/۱۶
تأیید نهایی : ۱۳۹۵/۰۳/۲۴
صفحات : ۱۲۲-۱۰۷

ارزیابی توسعه‌ی کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در زاگرس (منطقه مورد مطالعه: تاقدیس قلاجه و توده پراو بیستون)

دکتر شهرام بهرامی[۱]، دکتر محمدعلی زنگنه اسدی[۲]، علی جهانفر[۳]

چکیده

بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها در لندفرم‌های کارستی زاگرس می‌تواند راهنمای مناسبی برای تعیین میزان تکامل کارست باشد. هدف این پژوهش مقایسه‌ی توسعه‌یافتگی کارست به کمک ویژگی‌های هیدرودینامیک، هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در زاگرس چین‌خورده و زاگرس مرتفع است. در این تحقیق، منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های کارستی، مهمترین اکسیدهای موجود در سازندهای آهکی، داده‌های هیدرولوژی چشمه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای لندفرم‌های کارستی دو ناحیه شناسایی گردید. بعد از بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست و زمین‌شناسی در دو محدوده، منحنی فرود هیدروگراف ۴ چشمه در محدوده‌ی زاگرس چین‌خورده و ۷ چشمه در محدوده‌ی پراو - بیستون محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی ارتباط نزدیک بین لیتولژی و شکستگی‌ها با رفتار هیدرولوژی سیستم آب زیر زمینی در زاگرس چین‌خورده، و عدم ارتباط نزدیک بین شکستگی و لیتولژی در سیستم رورانده است. با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیک و منحنی فرود چشمه‌ها، درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست در محدوده‌ی پراو- بیستون ۵ تا ۶ تعیین شد. برای آبخوان کارستی قلاجه درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست ۲,۵ تا ۳ تعیین شد. جریان چشمه‌ها در پراو – بیستون دارای چند زیر رژیم خطی و آشفته است در حالی‌که در چشمه‌های قلاجه تنها یک زیر رژیم یکنواخت است. تجزیه و تحلیل آهک‌های دو محدوده و نیز آنالیز شیمیایی آب چشمه نشان‌دهنده‌ی خلوص بالای آهک بیستون نسبت به آهک آسماری و در نتیجه وجود جریان انتشاری-مجرایی در بیستون در مقایسه با رژیم انتشاری در آبخوان کارستی قلاجه است.

کلیدواژه‌ها: کارست، هیدرودینامیک، هیدروشیمیایی، چشمه کارستی، قلاجه، پراو- بیستون.

۱- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار (نویسنده مسؤول) s.bahrami@hsu.ac.ir
۲- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار asadi@sttu.ac.ir
۳- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار aalijahanfar54@yahoo.com

مقدمه

مطالعه منابع آب سازندهای کارستی، به دلیل تامین آب مصرفی جمعیّت قابل توجهی از مردم مناطق مختلف جهان دارای اهمیت بسیار زیادی است. از عمده چالشهای پیش رو در ایران کاهش منابع آبی و محدودیت بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی است. بخش عمده‌ای از این منابع به شکل منابع‌آب کارست در سازندهای مستعد توسعه کارست مانند سازندهای کربناته در زاگرس شکل گرفته‌اند.در یکصد سال‌اخیر مطالعات گسترده‌ای در رابطه با کارست و منابع آب کارست در دنیا انجام شده است (*Milanovic, 1981: 1-434; Atalay,2003:196-203; Gilli et al, 2010: 64-34; Ford and Williams, 2007:1-554; Goldsceider et al, 2007:1-263; Milanovic,2004:1-328;Andreo etal,2006:54-73; Mohamadi et al, 2007:206-220.*) .

در ایران نیز اخیراً به واسطه‌ی اهمیت موضوع، مطالعاتی در زمینه کارست انجام شده است *(مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸: ۶۵-۵۱؛ رنگزن و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۳۹-۵۲۸؛ جهانی بهبهانی، ۱۳۷۲: ۱۵۵-۱؛ کاظمی و همکاران، ۱۳۸۵: ۴۱- ۳۳؛ کلانتری، ۱۳۸۸:۱۴۷-۱۳۵؛ تالی‌قهرودی و همکاران، ۱۳۹۳: ۳۹-۲۷؛ دشتی برمکی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۰۰- ۸۹؛ مرادی، ۱۳۸۹: ۲۳-۲۱؛ بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸۴-۷۱؛ قبادی و همکاران، ۳۱۰:۱۳۹۰-۲۹۹؛ یمانی وهمکاران،۱۳۹۰: ۶۶-۵۷؛ ولایتی و همکار، ۱۳۹۱: ۱۸۹-۱۷۱).*

تحول کارست درکوه پراو- بیستون، نقش مهمی درتغذیه آبخوان‌های کارستی دارد و خصوصیات تکتونیکی، زمین‌شناسی و اقلیم گذشته باعث توسعه و تحول کارست در منطقه مذکور شده و عوارض کارستی نقش زیادی در تغذیه منابع آب زیرزمینی دارند *(محمودی، ۱۳۸۰: ۹۳).*

تحول و توسعه‌ی کارست تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد که در این میان نقش ترکیب سنگی و ویژگی‌های آن و عوامل ساختاری همچون گسل‌ها و درزه‌ها اهمیت زیادی دارد *(کلانتری و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۳۵).*

لندفرم‌های کارستی در مسیرهایی شکل می‌گیرند که توسط عوامل ساختاری کنترل می‌شوند (*Ford and Williams, 2007:33*).

شکستگی‌های توده‌های سنگی در توسعه‌ی کارست نقش اساسی دارند. با توجه به وجود درز و شکاف‌های زمین ساختی همراه با فعالیّت‌های انحلالی، شرایط برای نفوذ آب به صورت متلاطم در راستای ژرفا و قرارگیری بیشتر سنگ‌های (در واحد سطح) در معرض انحلال فراهم می‌شود (*Milanovic, 2004: 34*).

چشمه‌های کارستی تنها محلی هستند که می‌توان با کمک مدل‌های کمّی و هیدروگراف جریان چشمه‌ها، اطلاعات کاملی از عملکرد کل سیستم، کارست در یک ناحیه به دست آورد (*Bakalowicz, 2005: 158*).

نتایج هیدروژئوشیمی چشمه‌های کارستی نشان-دهنده‌ی حالت فوق اشباع کلسیت و دولومیت در دوره‌ی خشک است. میزان انحلال به سرعت جریان و نوع جریان (آشفته و خطی) وابسته است *(قدیمی و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۷۲)*. پاسخ هیدروشیمیایی و هیدرودینامیکی در آبخوان‌های کارستی به شرایط جریان در این آبخوان‌ها بستگی دارد. هیدروگراف چشمه‌ها بازتاب مستقیم همه فرایندهای فیزیکی است که در آبخوان کارستی جریان آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (*Kuhta et al, 2012: 41*). نقش لیتو استراتیگرافی در کارستی شدن رخنمون‌های کربناته منطقه نوا- قلاجه در غرب استان کرمانشاه حاکی از آن است که خطواره‌های منطقه در دو جهت کلی قرار دارند و تغذیه‌ی آبخوان‌ها از طریق این خطواره‌ها و تخلیه‌ی آبخوان‌ها در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌ها صورت می‌گیرد *(قمی‌اویلی، ۱۳۷۶: ۱۱۹).*

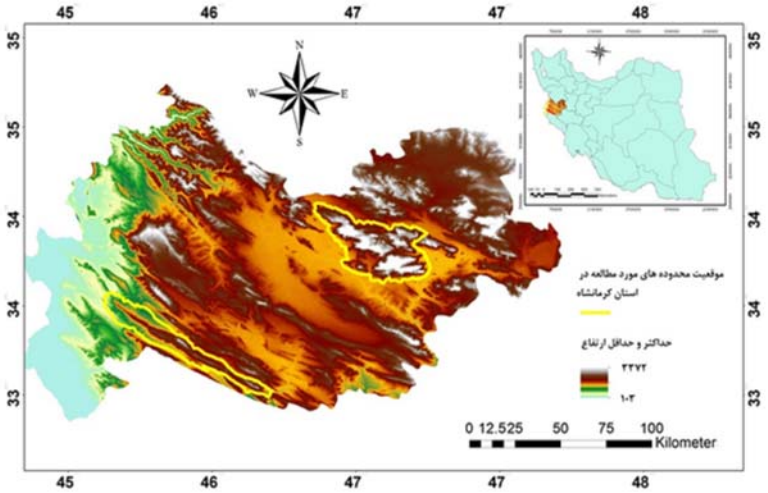
فاصله از شکستگی‌ها ارتباط نزدیکی با موقعیت رخنمون چشمه‌ها دارد و درجه‌ی اشباع کلسیت با تراکم شکستگی‌ها در آهک‌های زاگرس دارد *(کلانتری، ۱۳۸۸: ۱۳۵)*. تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف روش مناسبی برای بررسی‌های هیدرولوژیکی است که می‌توان برای تفسیر ویژگی‌های آبخوان کارستی از آن استفاده کرد *(Kresic and Bonacci, 2010: 130)*. تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه‌ها و منحنی فرود وضعیت آبخوان کارستی را از نظر شکستگی سازند کارستی نشان می‌دهد *(Boonacci, 1993:51)*.

در ارتباط با استفاده از ضریب فروکش، جهت ارزیابی شرایط هیدرولوژیکی و هندسی آبخوان کارستی، تنها استفاده از رابطه‌ی خطی مایلت کافی نیست، بلکه در ارزیابی شرایط آبخوان کارستی به خصوص در دوره‌ی خشک، از داده‌های هیدروشیمیایی و مدل‌های عددی می‌توان کمک گرفت (*Fiorillo, 2012:156*).

با مطالعه‌ی منحنی فرود هیدروگراف پنج چشمه در آبخوان کارستی حوضه‌ی الوند درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست تعیین و نوع زیر رژیم چشمه‌ها مشخص شد که نشان‌دهنده‌ی تأثیر تفاوت‌های محلی و ژئومورفولوژی سطحی کارست بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان کارستی است *(باقری و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۳۳)*.

مطالعه‌ی رفتار هیدرودینامیکی چشمه کارستی گیلان غرب در غرب زاگرس در ایران‌با استفاده از داده‌های *EC*، *PH*، دما و یونهای عمده در هر دو هفته یکبار از سپتامبر ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ اندازه‌گیری شد. سهم جریان مجاری در فصل خشک کاهش می‌یابد. این نوع رفتار در آبخوان‌های با حوضه‌ی کشیده و باریک رخ می‌دهد. پهنه‌های کارستی در شمال غربی زاگرس و در استان کرمانشاه نقش مهمی در تغذیه‌ی آبخوان‌ها دارند *(Karimi et al,2005:788)*. وجود بیش از ۵۵۰ سراب و چشمه‌ی کارستی در استان کرمانشاه نقشی حیاتی در تأمین آب آشامیدنی و مصارف صنعتی و کشاورزی دارد *(ملکی و اویسی، ۱۳۹۱: ۲)*.

هدف این پژوهش مقایسه‌ی توسعه‌یافتگی کارست با تأکید بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی به عنوان مهمترین عوامل پاسخ دهنده به شرایط ژئومورفولوژی و سنگ‌شناسی کربناته در دو سیستم کارستی تاقدیس قلاجه و سیستم کارست پرآو - بیستون است.



شکل ۱: موقعیت تاقدیس قلاجه و توده پراو- بیستون در استان کرمانشاه و غرب ایران

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

محدوده‌ی مورد مطالعه

نواحی مورد مطالعه به ترتیب در توده پراو- بیستون در واحد زاگرس شکسته و تاقدیس قلاجه در زاگرس چین‌خورده قرار دارند.

توده پراو- بیستون با مساحت ۱۰۵۰ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ′ ۲۸ ° ۴۵ تا ′ ۵ ° ۴۶ شرقی و عرض جغرافیایی ′ ۲۰ ° ۳۴ تا ′ ۴۳ ° ۳۴ شمالی و تاقدیس قلاجه با مساحت ۸۳۴ کیلومتر مربع طول جغرافیایی ′ ۵۳ ° ۴۵ تا ′ ۳۵ ° ۴۶ شرقی و عرض جغرافیایی ′ ۹ ° ۳۴ تا ′ ۴۱ ° ۳۴ شمالی قرار گرفته‌اند (شکل ۱). بیشینه ارتفاع درتوده پراو-بیستون ۳۴۴۰ متر و در تاقدیس ۲۳۵۵ متر است. جهت‌یافتگی اصلی محور تاقدیس شمال غربی- جنوب شرقی است. گسل اصلی تاقدیس از نوع برشی با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی است. هریک از این واحدها در دوره‌های زمین‌شناسی با توجه به موقعیتی که دارند شرایط رسوبی و تکتونیکی متفاوتی داشته‌اند. همین امر در شکل‌گیری لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی متفاوت در هر دو تأثیر اساسی داشته است. با توجه به تاریخچه‌ی زمین‌شناسی در دوره‌ی ژوراسیک شرایط رسوبگذاری ثابتی در زاگرس به وجود آمده است و بر روی فلات قاره و پلاتفرم کربناته داخلی رسوب‌های کم عمق آهکی ته‌نشین شده است (آهک بیستون) در حوضه‌های عمیق چرت و رادیولاریت انباشته شده است. این ویژگی به خوبی در حوضه‌های مجاور توده‌ی بیستون و پراو در کرمانشاه دیده می‌شود. در تاقدیس قلاجه سازندهایی شکل گرفته نمایانگر محیط آبی در کرتاسه‌ی میانی و پایانی است. تاقدیس قلاجه با توپوگرافی پشت نهنگی دارای هسته‌ای از مارن و شیل گورپی است که توسط آهک آسماری پوشیده شده است. مهمترین سازندهای کربناته در تاقدیس قلاجه به ترتیب وسعت و رخنمون عبارتند از سازند آهکی آسماری، سازند ایلام و سازند آسماری- شهبازان. وجود گسل خوردگی و جنس سازند سبب شکل‌گیری لندفرم‌های متنوع کارستی خصوصاً در شرق تاقدیس گردیده، چرخه‌ی آب‌های زیرزمینی (در گذشته یا حال) در ارتباط با شکست‌های سطحی در سنگ‌های کربناته با فرایندهای انحلال و رسوب‌گذاری عامل شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست در محدوده‌ی قلاجه شده است. اقلیم هردو محدوده‌ی مدیترانه‌ای است. گرادیان دما و بارش در هر دو منطقه تحت تأثیر عامل ارتفاع هستند.نمودار گرادیان دمای سالانه نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالای دما و ارتفاع است. جدول۴، ویژگی‌های بارش ایستگاه‌های دو محدوده را نشان می‌دهد.

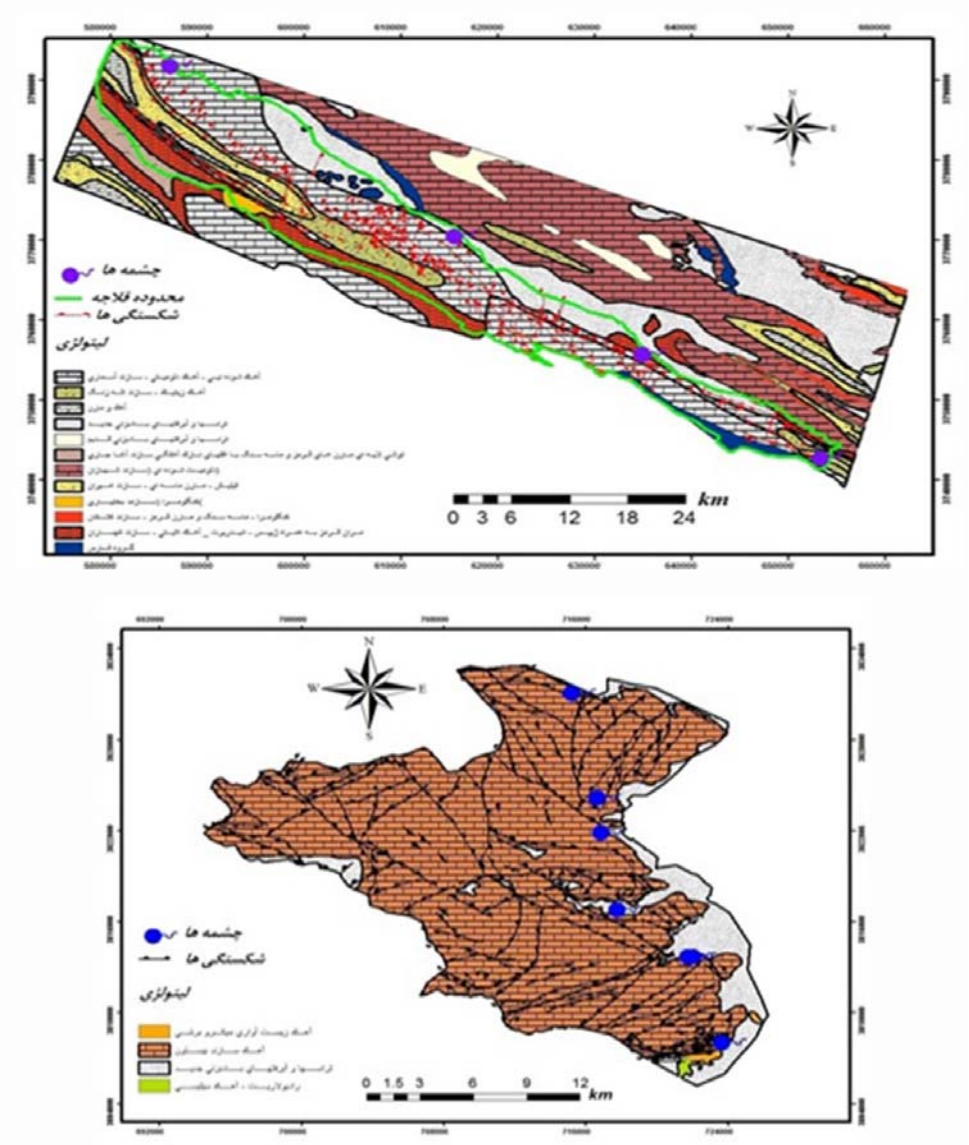
شرایط کارست‌زایی در دو محدوده

خلوص بالای آهک بیستون، ضخامت سازند کربناته، عملکرد آرام تکتونیک، امتداد و گستردگی درز و شکاف‌ها و عملکرد مؤثر گسل اصلی زاگرس، کلکسیونی از اشکال کارستی مانند لاپیه، فروچاله‌ها (دولین، اووالا و پولیه)، غار، چشمه‌های کارستی و دیگر اشکال را می‌توان در توده پراو - بیستون مشاهده نمود. یکی از مهمترین شواهد توسعه‌ی کارست وجود پولیه است، اساساً پولیه‌ها نماد نواحی کارستی هستند و وجود و وسعت پولیه‌ها بیانگر گسترش کارست کامل در یک ناحیه است *(Cooper et al, 2011:118-131)*. در زاگرس چین‌خورده، علیرغم مساعدت اقلیم و وجود سازندهای مساعد شکل‌گیری کارست مانند آهک‌های توده‌ای آهک آسماری- شهبازان، لندفرم‌های کارستیک ناحیه متعدد اما گستردگی و تکامل آنها محدودتر از توده‌ی پراو- بیستون است.

شکل ۲: تصاویر اشکال کارستی محدوده‌های مورد مطالعه *(الف)* شکل‌گیری لاپیه در توده بیستون – پراو
***(ب)* جاما *(ج)* دولین ریزشی در توده بیستون- پراو، اشکال کارستی محدوده قلاجه**
***(د)* توسعه پولیه با کف هموار در آهک آسماری تاقدیس قلاجه (ه) درزه‌های توسعه‌یافته در آهک آسماری**
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، پس از بازدیدهای صحرایی از محدوده‌های مورد مطالعه، اشکال و لندفرم‌های کارستی، گسل‌ها و شکستگی‌ها شناسایی و موقعیت هر یک از آنها با استفاده از سیستم GPS مشخص گردید. با استفاده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی کرمانشاه، کرکسار، کامیاران، کرند و ایلام نقشه‌ی رقومی زمین‌شناسی دو محدوده‌ی مطالعاتی تهیه شد. با هدف تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف، از داده‌های آماری ایستگاههای هیدرومتری و باران‌سنج در دوره‌ی آماری ۱۳۹۱-۱۳۸۱ استفاده شد. با توجه به تفاوت‌های دو محدوده از منظر توسعه‌یافتگی کارست، تفاوت در سنگ‌شناسی کربناته، شرایط ژئومورفولوژی و شرایط اقلیمی از محدوده پراو- بیستون داده‌های تعداد ۵ آبخوان کارستی مشتمل بر ۷ چشمه و از محدوده قلاجه ۲ آبخوان کارستی شامل ۴ چشمه مورد استفاده قرار گرفت. روابط کمی متعددی جهت توضیح رفتار هیدرودینامیک چشمه‌ها وجود دارد. در هر چشمه‌ی کارستی یک یا چند رژیم جریان خطی یا آشفته به تخلیه آبخوان کارستی می‌پردازند. با استفاده از روابط کمی و منحنی فرود چشمه‌ها در فصل کم آبی می‌توان بسیاری از ویژگی‌های آبخوان کارستی را مطالعه نمود. منحنی فرود در چشمه‌های کارستی عبارت است از دوره‌ی زمانی بین حداکثر دبی (دبی پیک) تا افزایش مجدد دبی در پایان دوره‌ی کم‌آبی و افت منحنی فرود. از مهمترین روابط کمی که به توضیح منحنی فرود کمک می‌کند رابطه‌ی مایلت (۱۹۰۵) است. بسیاری از روابط کمی دیگر که حتی در سال‌های اخیر پیشنهاد شده‌اند، بر اساس رابطه‌ی مایلت هستند.



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی دو محدوده‌ی مورد مطالعه، موقعیت چشمه‌ها و توزیع شکستگی‌ها

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

رابطه ۱: $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$

در این رابطه Q_t آبدهی چشمه در زمان t برحسب متر مکعب بر ثانیه، Q_0 آبدهی اولیه‌ی چشمه در زمان ۰، e پایه لگاریتم طبیعی و α ضریب فروکش چشمه است که از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود.

رابطه ۲: $\alpha = \frac{\log Q1 - logQ2}{0/4343(t2-t1)}$

که در این رابطه مقدار $Q_1 = Q_0$ و $Q_2 = Q_t$ و $t_2 - t_1 = t$ است. در سال‌های بعد دو رابطه‌ی زیر به ترتیب برای جریان خطی و جریان آشفته پیشنهاد شد

Forkasiewicz & Paloc, 1967: 73-59; Cullman, 1980: 7-9).

برای جریان خطی، رابطه همان رابطه خطی مایلت است و برای جریان آشفته رابطه کولمان به شکل رابطه (۳) است.

رابطه ۳: $Q_t = Q_0(1-\beta t)$

در این رابطه رابطه، Q_t آبدهی چشمه در زمان t برحسب متر مکعب بر ثانیه، Q_0 آبدهی اولیه چشمه در زمان ۰ و β ضریب فروکش در جریان آشفته است که برابر با شیب‌منحنی فروکش و t مدت‌زمان افت منحنی فروکش است. در سال‌های اخیر این روابط به شکل گسترده‌ای برای بررسی و توضیح رژیم‌های آبدهی به خصوص در آبخوان‌های کارستی استفاده شده است *(Malik &Vojtkaova, 2012: 2245-2257)*. از این روابط جهت محاسبه درجه توسعه‌ی کارست و تهیه‌ی مدلی برای مقایسه‌ی توسعه‌یافتگی کارست به کمک رژیم جریان چشمه کارستی بهره‌برداری شد. برای ارزیابی ویژگی‌های مربوط به حجم مخزن کارستی و تعیین مشخصات اصلی‌چشمه‌ها علاوه بر تعیین آبدهی میانگین، آبدهی بیشینه و آبدهی کمینه، ضرایب ناهمشکلی *(Kn)* و کمترین آبدهی *(Km)* که بیان‌کننده وضعیت آبخوان کارستی هستند، محاسبه شد (جدول۴).هرچه میزان ضرایب فوق‌الذکر به۱ نزدیک‌تر باشند، آبدهی چشمه یکنواخت‌تر و بادوام‌تر است. یکی از ضرایب تعیین‌کننده در ویژگی‌های هیدرودینامیک چشمه‌ها، ضریب تغییرات دبی چشمه‌ها است که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

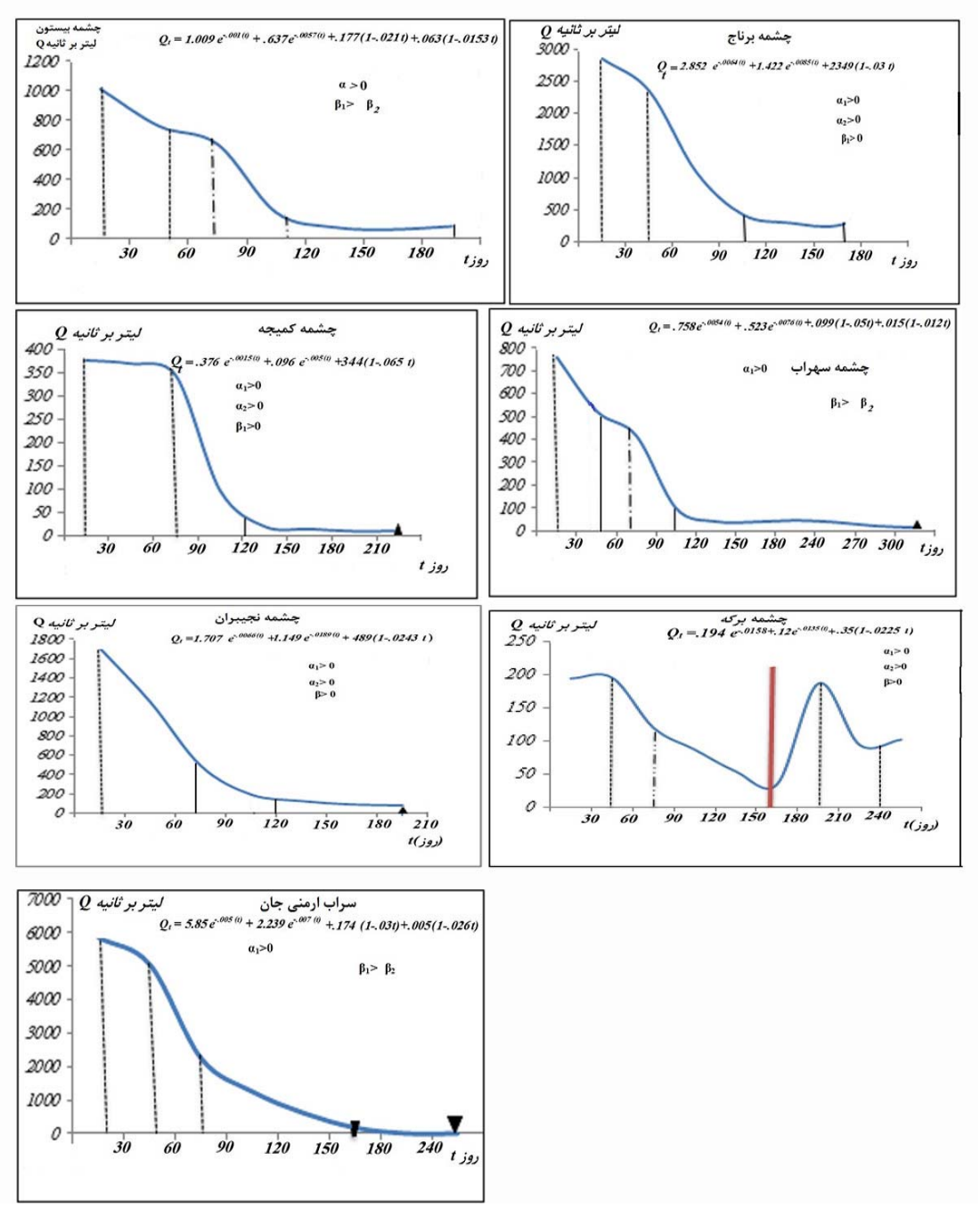
رابطه ۴: $Cv = s/x \times 100$

در این رابطه S انحراف معیار دبی و X میانگین دبی سالانه است (جدول ۴). به منظور به کارگیری روش مالیک و وجتکوا در تعیین رژیم هیدرولوژی چشمه‌ها و درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست، از آمار ده‌ساله چشمه‌ها به دلیل حذف تأثیرگذاری عوامل ناگهانی در منحنی فرود استفاده شد *(باقری و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۳۹)*. پس از به کارگیری روابط فوق و تحلیل ویژگی‌های هیدروشیمی آب چشمه‌ها، درجه توسعه‌یافتگی کارست در هر کدام از آبخوان‌های کارستی تعیین شد.

جدول ۱ : درجه توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان‌های کارستی

ویژگی کارستی	مشخصات منحنی فرود	رابطه منحنی فرود	زیر رژیم های جریان	درجه توسعه کارست
مناطق گسلی	$\alpha_1 > .۰۰۱$	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t}$	یک زیر رژیم	۱ و /۵
نواحی تکتونیک و نفوذ پذیری زیاد	$\alpha_1 > ۰,۰۰۷$	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t}$	یک زیر رژیم مقدار بالای α.	۲و۲,۳
آبخوان‌های دارای درز و شکاف کوچک	$\alpha_1 < ۰,۰۰۲۴$ $\alpha_2 < ۰,۰۰۳۳$	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t} + Q_۲ e^{-\alpha_۲ t}$	دارای دو یا چند زیر رژیم خطی با مقادیر کم α .	۲,۵، ۳
توسعه‌ی نامنظم، شکاف‌های بزرگ و مجراهای کوچک	$\alpha_1 = ۰,۰۰۲۴$-$۰,۰۰۴۳$ $\alpha_2 = ۰,۰۶$-$۰,۱۶$ $\alpha_1 > ۰,۰۰۴۳$, $\alpha_2 < ۰,۰۶$ $\alpha_1 = ۰,۰۴۱$-$۰,۰۱۸$ $\alpha_2 = ۰,۰۵۵$ - $۰,۰۱۶$	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t} + Q_۲ e^{-\alpha_۲ t}$	دارای دو یا چند زیر رژیم خطی با مقادیر بالای α.	۳,۵، ۳,۷ ۴
آبخوان گسلی شبکه متراکم درزه‌ها	$۰,۰۱۸ < \alpha_1$ $۰,۰۱۶ < \alpha_2$ مقادیر کم و α β	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t} + Q_۲ e^{-\alpha_۲ t} + (۱-\beta_۱ t)$	دارای زیر رژیم‌های آشفته و خطی و غلبه جریان خطی .	۴,۳ ۴,۷ ۵
درزه شکاف‌های متراکم و مجراهای وسیع	$\alpha_۱ > ۰$ $\alpha_۲ > ۰$ $\beta_۱ > ۰$	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t} + Q_۲e^{-\alpha_۲ t} + Q_{.۳} + (۱-\beta_۱ t)$	یک زیر رژیم آشفته و دو زیر رژیم خطی.	۵,۵
درزه و شکاف ها متراکم و مجرای وسیع	α و β مقادیر زیاد	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t} + Q_۲ e^{-\alpha_۲ t} + Q_{.۳} + (۱-\beta_۱ t) + Q_{.۴} + (۱-\beta_۲ t)$	دارای دو زیر رژیم اشفته و دو زیر رژیم خطی غلبه با زیر رژیم خطی.	۶
آبخوان توسعه یافته، درزه‌ها و شکاف‌های وسیع ناشی از تکتونیک ومجراهای وسیع	α و β مقادیر زیادو $\beta_۱ < \beta_۲$	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t} + Q_۲ e^{-\alpha_2 t} + Q_{.۳} + (۱-\beta_۱ t) + Q_{.۴} + (۱-\beta_۱ t) + Q_{.۵} + (۱-\beta_۲ t)$	یک زیر رژیم خطی و دو یا سه زیر رژیم آشفته وغلبه با رژیم خطی در تخلیه جریان.	۷
آبخوان بسیار توسعه یافته و مجراهای زیاد و کاهش اثر درزه‌ها در تخلیه	α و β مقادیر زیاد	$Q_t = Q_۱e^{-\alpha t} + Q_۲ e^{-\alpha_۲ t} + Q_{.۳} + (۱-\beta_۱ t) + Q_{.۴} + (۱-\beta_۲ t) + Q_{.۵} + (1-\beta_۲ t)$	یک زیر رژیم خطی و دو زیر رژیم آشفته رژیم آشفته عامل اصلی تخلیه.	۸
آبخوان کارستی به خوبی توسعه یافته	α و $\alpha_۱ > \alpha_2$ ۰ B >۰	$Q_t = Q_{.۳} + (۱-\beta_۱ t)$	وجود جریان آشفته و تخلیه از منطقه وادوز.	۸,۵
آبخوان کارستی توسعه یافته با ارتباط کم با منطقه فراتیک	$\beta_۱$ و $\beta_۲$ مقادیر کم	$Q_t = Q_{.۳} + (۱-\beta_۱ t) + Q_{.۴} + (۱-\beta_۲ t) + (-۱\ \beta_۲ t)$	دارای دو رژیم آشفته.	۹
آبخوان کارستی توسعه یافته تخلیه از وادوز	$\beta_۱$و $\beta_۲$و $\beta_۳$ مقادیر زیاد	$Q_{.۳} + (۱-\beta_۱ t) + Q_{.۴} + (۱-\beta_۲ t) + Q_{.۵} + (۱-\beta_۳ t)$	دارای سه رژیم آشفته متفاوت.	۱۰

مأخذ: Malik & Vojtkova, 2012



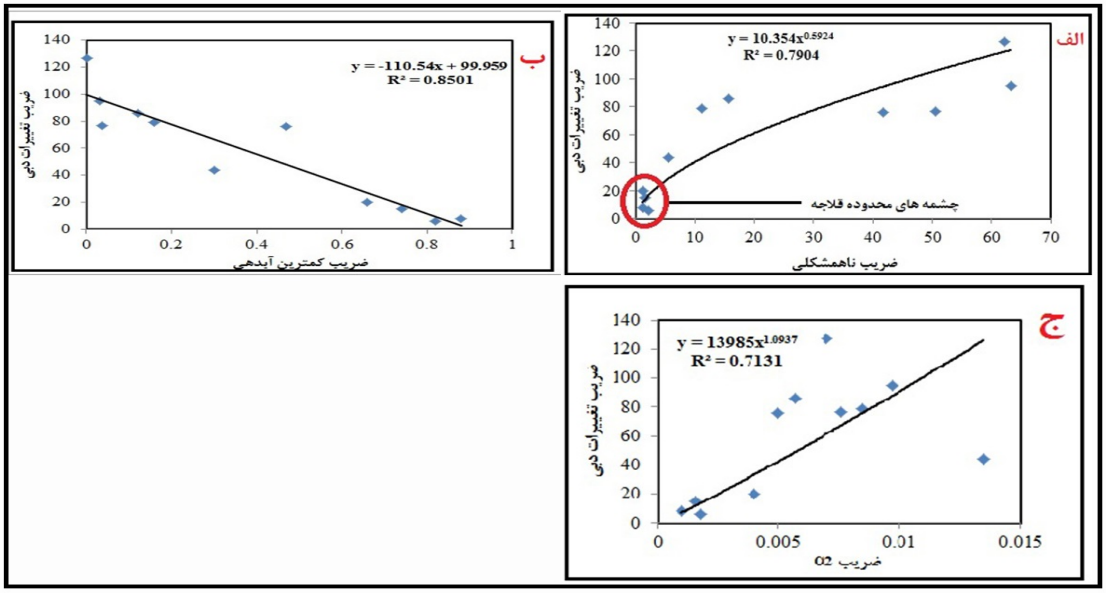
شکل۴: نمودار منحنی فرود، رابطه منحنی فرود در چشمه‌های کارستی و مقادیر α وβ برای تعیین درجه توسعه‌یافتگی کارست

تهیه و ترسیم : نگارندگان، ۱۳۹۴

تحلیل هیدرو دینامیک و منحنی فرود چشمه‌ها

به منظور تعیین درجه توسعه‌یافتگی کارست، منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های مورد مطالعه در آبخوان‌های کارستی پراو- بیستون و قلاجه ترسیم گردید، رابطه‌ی هر یک از منحنی‌ها با توجه به (جدول ۱) محاسبه شد. مقادیر α و β برای تعیین درجه توسعه‌یافتگی کارست مشخص شد. با توجه به (شکل ۴) و (جدول ۱) درجه توسعه‌یافتگی کارست برای تمام چشمه‌های محدوده‌ی قلاجه ۲,۵ تا ۳ می‌باشد. در این آبخوان‌ها تغذیه عملاً از طریق درز و شکاف‌های نه‌چندان توسعه‌یافته‌ی سطح تاقدیس صورت می‌گیرد. عمده‌ترین شکل کارستی در تاقدیس، انواع لاپیه، دولین‌های انحلالی و ریزشی با محدودیت نفوذپذیری و پولیه می‌باشد که بستر پولیه‌ها به‌دلیل فرایند خاکزایی با رسوبات نه چندان نفوذپذیر پر شده است. به علت جوانی کارست و غلبه درز و شکاف‌های کوچک به مجاری وسیع، ارتباط زیادی بین لیتولوژی و آب ذخیره در آبخوان وجود دارد. مقادیر بسیار کم ضریب α نمایانگر تغییر ناچیز در آبدهی در طول دوره‌ی خشکی نسبت به تمام سال است. در آبخوان‌های کارستی محدوده‌ی پراو- بیستون شکل منحنی فرود و روابط منحنی فرود وضعیتی کاملاً متفاوت دارد. در این آبخوان‌ها چشمه‌های ارمنی‌جان، چشمه سهراب و بیستون هر یک دارای چهار زیر رژیم، شامل دو زیر رژیم خطی و دو زیر رژیم آشفته، هستند. درجه توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان مربوط به این چشمه‌ها مطابق (جدول ۱) و (شکل ۴) عدد ۶ می‌باشد. در این آبخوانها غلبه تخلیه با جریان خطی است. شکل (۴) وجود دو جریان آشفته در این چشمه‌ها و بالا بودن مقادیر β۱ نسبت به β۲ حاکی از تغییرات شدید منحنی فروکش در این چشمه‌ها است. در چشمه‌های کمیجه، نجیبران، برناج و برکه با توجه به (شکل ۴) و (جدول ۱) درجه توسعه‌یافتگی کارست ۵,۵ و یک زیر رژیم آشفته با دو زیر رژیم خطی تخلیه آبخوان در فصل خشک را انجام می‌دهند. مقادیر α_1 ، α_2 و β_1 بیشتر از صفر است. (شکل ۴)گویای این است که چشمه‌های محدوده‌ی تاقدیس قلاجه دارای منحنی فرود یکنواختی هستند و تنها دو زیر رژیم خطی با تغییر بسیار ناچیز در این آبخوان‌ها حاکم است. (شکل ۵) نمودار همبستگی بین تغییرات آبدهی چشمه‌ها و ضریب ناهمشکلی، ضریب α و ضریب کمترین آبدهی در آبخوان‌های کارستی دو محدوده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ (الف)، دایره‌ی قرمز رنگ چهار چشمه قلاجه را نشان می‌دهد، مقدار ضریب تغییرات برای چشمه‌های محدوده‌ی قلاجه زیر ۲۰ درصد است که نشان‌دهنده‌ی تغییرات ناچیز آبدهی و تأثیرپذیری کمتر این آبخوان‌های کارستی از تغییرات بارشی است. ضریب تغییرات در چشمه‌های محدوده‌ی پراو-بیستون، چند برابر ضریب تغییرات چشمه‌های قلاجه است. در مورد چشمه ارمنی‌جان، این مقدار حتی به ۱۲۷درصد می‌رسد. در مورد دیگر چشمه‌ها، نیز از ۴۴ درصد در چشمه برکه، تا ۹۵ درصد در چشمه نجیبران متغیّر است (جدول ۵). وجود اشکال متعدد انحلالی در محدوده‌ی پراو- بیستون مانند انواع کارن، پولیه‌های وسیع، اووالا با ابعاد متفاوت و دولین‌ها (شکل۲) سبب شده منحنی فرود چشمه‌ها دارای چند رژیم با آبدهی متغیّر باشد. نمودار همبستگی ضریب α و تغییرات دبی بیان‌کننده‌ی رابطه‌ی مستقیم بین ضریب فروکش چشمه‌ها با تغییر در مقادیر آبدهی است، بررسی نمودار الف، شکل ۵ چهار چشمه محدوده قلاجه با تغییرات بسیار ناچیز در آبدهی و منطبق بر خط همبستگی را در مقابل چشمه‌های محدوده‌ی پراو- بیستون با پراکنش بسیار زیاد و تغییرات زیاد در آبدهی دیده نشان می‌دهد. در نمودار همبستگی بین

آبدهی و ضریب کمترین آبدهی رابطه عکس است، به این معنی که توزیع آبدهی در چشمه‌های محدوده‌ی پراو- بیستون از یک رژیم یکنواخت تبعیت نمی‌کند. رژیم آشفته و مجرایی و پایین بودن حجم ذخیره دینامیک، ناشی از تراکم زیاد درز و شکاف در آهک بیستون است. بالا بودن حجم ذخیره دینامیک چشمه‌ها در محدوده‌ی قلاجه سبب شده نوسان زیادی بین آبدهی حداکثر و حداقل چشمه‌ها وجود نداشته باشد. تغذیه‌ی آبخوان‌های کارستی در قلاجه به صورت انتشاری و از راه لاپیه، درزه‌ها و شکاف‌هایی است که در آهک آسماری شکل گرفته‌اند. برخلاف توده‌ی پراو- بیستون، رسوب‌زایی زیاد در کف پولیه‌ها در تاقدیس قلاجه از عوامل کاهش سرعت تغذیه از طریق پولیه در رأس تاقدیس است. در توده‌ی پراو- بیستون به جای پولیه با کف هموار و تغذیه محدود، وجود اووالا با بستری ناهموار که دولین‌ها و جاماهای فراوانی در آن توسعه پیدا کرده‌اند، زمینه‌ی نفوذپذیری و واکنش سریع آبخوان به تغییرات رژیم بارشی را فراهم می‌کند.



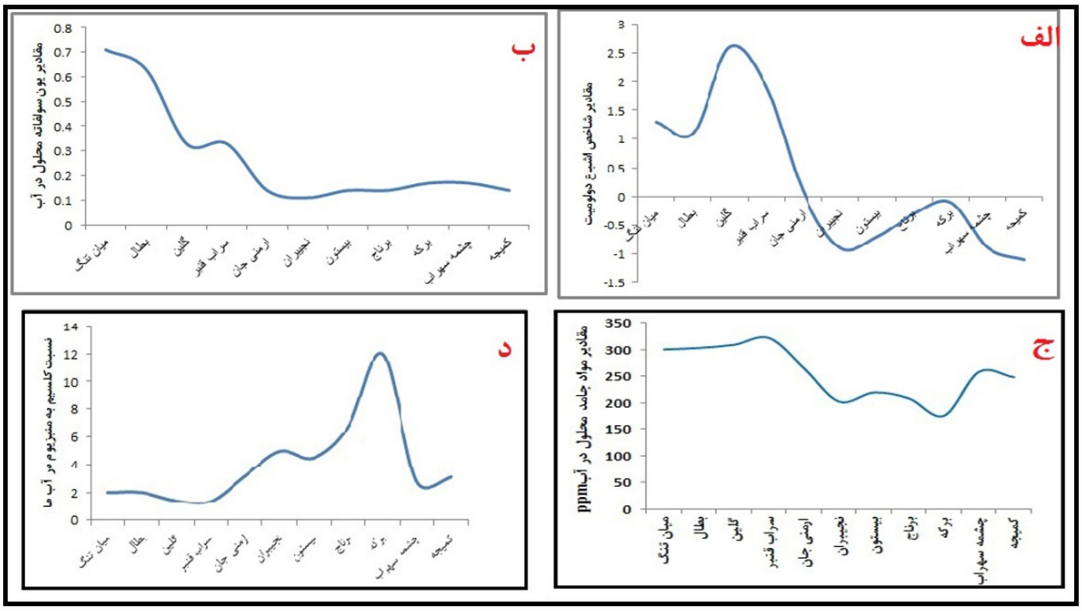
شکل ۵: نمودار الف، رابطه‌ی ضریب تغییرات دبی و ضریب ناهمشکلی چشمه‌ها، ب رابطه مستقیم ضریب تغییرات دبی کمترین آبدهی را نشان می‌دهد و نمودار ج ضریب تغییرات دبی و ضریب α در چشمه‌ها را نشان می‌دهد.

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

تحلیل هیدرو شیمی چشمه‌های کارستی

در جدول ۳ میزان شاخص اشباع برای هر یک از چشمه‌های کارستی و نیز نسبت Ca به Mg در دو محدوده آمده است. با هدف مطالعه تأثیر ساختار زمین‌شناسی و لیتولوژی بر ترکیب شیمیایی آب چشمه‌ها، داده‌ها هیدروشیمیایی آب تهیه و سپس به ترسیم نمودار پایپر حاصل از آزمایش نمونه آب اقدام شد. بالا بودن میزان آنیون‌ها و کاتیون‌ها و نیز هدایت الکتریکی زیاد و سختی بالای آب در نمودار شکل ۶ و نمودار پایپر (شکل ۷) نشان می‌دهد که سطح تماس بین آب و لیتولوژی تاقدیس قلاجه بالا است و تکامل کارست در مراحل اولیه می‌باشد. نسبت کلسیم به منیزیوم برای چشمه‌های محدوده‌ی قلاجه به عدد یک نزدیک است و این مقدار برای هیچ یک از چشمه‌ها در

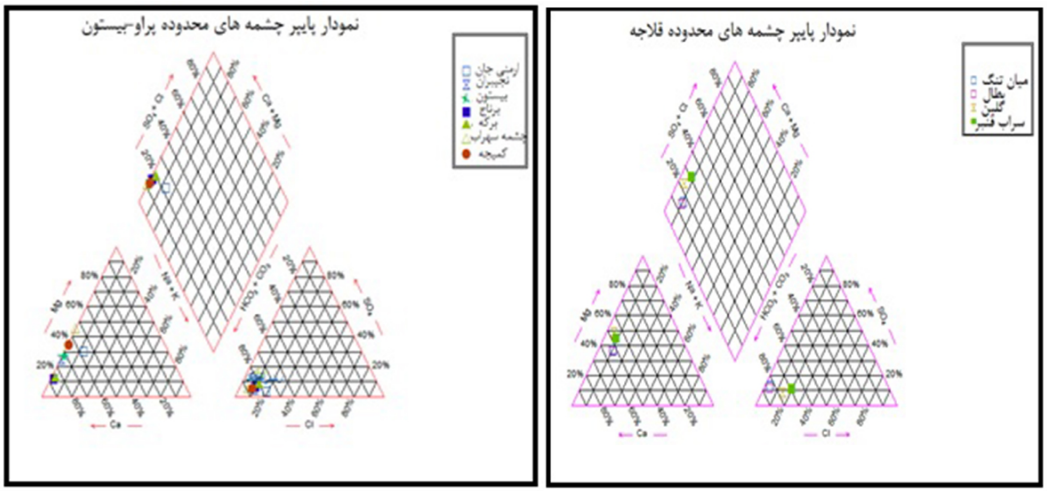
این محدوده از ۲٫۵ فراتر نمی‌رود درحالی‌که این نسبت در چشمه‌های محدوده‌ی پراو- بیستون بالاتر از ۳ و حتی در چشمه برکه به عدد ۱۲ می‌رسد (شکل۶). چنین حالتی خلوص بالای آهک را نشان می‌دهد. نسبت پایین کلسیم در چشمه‌های آبخوان کارستی محدوده‌ی قلاجه در مقایسه با پراو- بیستون به روشنی گویای آبخوان کارستی دولومیتی در محدوده‌ی قلاجه و وجود آبخوان کارستی آهکی در محدوده‌ی پراو- بیستون است (شکل ۶ و جدول ۳). مقادیر شاخص اشباع SI_d برای چشمه‌های محدوده‌ی پراو- بیستون تحت شرایط اشباع و منفی است (شکل ۶). این امر بیانگر وجود جریان انتشاری- مجرایی، عدم ارتباط زیاد آب و سازندهای منطقه است. در آبخوان قلاجه مقادیر شاخص‌های اشباع مثبت می‌باشد که دلیل ارتباط زیاد آب زیرزمینی با لیتولوژی آبخوان است.



شکل۶: نمودار الف- شاخص اشباع دولومیت SI_d در چشمه‌ها ب- یون سولفاته محلول در آب چشمه‌ها ج- مقادیر مواد جامد محلول درآب چشمه‌ها د- نسبت کلسیم به منیزیوم در آب چشمه‌ها را نمایش می‌دهد.

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

این ارتباط بیان‌کننده‌ی عدم توسعه‌ی کارست و شکستگی‌ها در محدوده‌ی قلاجه است. بالا بودن میزان یون بی‌کربناته و یون سولفاته در چشمه‌های کارستی قلاجه بیشتر از چشمه‌های محدوده‌ی پراو- بیستون است (شکل ۶). این امر ناشی از رسوب بیشتر کانی‌ها در مسیر حرکت آب زیرزمینی و مجاورت بیشتر جریان با لیتولوژی نسبت به محدوده‌ی پراو- بیستون است. بالابودن میزان این یون‌ها سبب سختی آب چشمه‌های قلاجه در مقایسه با آب چشمه‌های پراو- بیستون شده است.



شکل ۷: نمودار پایپر نمایش نتایج تجزیه و تحلیل شیمیایی آب چشمه‌ها

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

نتیجه

گستردگی سازند آهکی بیستون در آبخوان‌های کارستی توده پراو- بیستون که قابلیت انحلالی زیادی دارد، زمینه را برای شکل‌گیری و توسعه‌ی اشکال کارستی فراهم نموده است. انواع متنوعی از اشکال کارستی در محدوده‌ی پراو بیستون، مانند لاپیه در ابعاد و انواع مختلف دولین، فروچاله‌ها، پولیه با ابعاد وسیع و غارها و دره‌های کارستی را می‌توان مشاهده کرد. از جمله مهمترین پیامدهای توسعه‌ی کارست و تأثیرپذیری آن از تکتونیک و لیتولوژی خاص منطقه شکل‌گیری چشمه‌ها با رژیم‌های آبدهی متفاوت است. آبخوان‌های کارستی محدوده‌ی پراو- بیستون دارای درجه توسعه‌ی کارست ۵ و ۶ هستند در حالی‌که چشمه‌های آبخوان تاقدیس قلاجه با داشتن منحنی فرود یکنواخت دارای یک یا دو رژیم کم نوسان هستند و درجه‌ی توسعه کارست در این محدوده ۲,۵ تا ۳,۵ می‌باشد. از مهمترین عوامل در پایین بودن درجه توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان‌های این ناحیه ویژگی‌های لیتولوژی و ژئومورفولوژی است. آهک آسماری گرچه از سازندهای مستعد انحلال در این ناحیه است، جوانی و خلوص کمتر نسبت به آهک بیستون از یک طرف و تأثیر عوامل ژئومورفولوژیک مانند شکل آبخوان، ارتفاع و تأثیر متفاوت عملکرد تکتونیک ازطرف‌دیگر سبب شده درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست در قلاجه پایین‌تر از توده‌ی پراو-بیستون باشد. شکل آبخوان در تاقدیس قلاجه کشیده تر از آبخوانهای کارستی پراو- بیستون است (شکل ۳). آنالیز شیمیایی آب چشمه‌ها می‌تواند بیانگر توسعه‌یافتگی یا عدم توسعه‌ی کارست در یک ناحیه باشد. در محدوده پراو- بیستون آب چشمه‌ها با رخساره کلسیتی و نسبت بالای Ca به Mg که در مواردی مانند چشمه برکه حتی به عدد ۱۲ می‌رسد، خلوص بالای آهک در این محدوده را نشان می‌دهد. در مقابل، پایین بودن نسبت Ca به Mg در آبخوان‌های کارستی قلاجه مبین دولومیتی بودن کارست در این محدوده است. شاخص اشباع مثبت در چشمه‌های محدوده‌ی قلاجه نشان‌دهنده‌ی وجود جریان انتشاری در آبخوان‌های این محدوده و عدم توسعه‌ی کامل کارست است، در حالی‌که در محدوده‌ی پراو- بیستون شاخص اشباع منفی دلیل تراکم بیشتر شکستگی‌ها و وجود جریان

مجرایی- انتشاری(خطی- آشفته) است. مطالعه ضریب آلفا و بالا بودن سختی املاح (TDS) و حجم بالای ذخیره دینامیکی چشمه‌ها نشان‌دهنده مسافت زیادی است که آب برای رسیدن به خروجی چشمه باید طیّ کند.در مقایسه‌ی توسعه‌ی کارست در دو ناحیه، کاربرد ویژگی‌های هیدرودینامیک و هیدروشیمی شاخص ارزشمندی است. ژئومورفولوژی متفاوت دو ناحیه سبب شده که علیرغم شرایط مشابه بارشی، ارتفاع بیشتر و فرم‌های توسعه‌یافته سطحی کارست، روی توسعه-یافتگی کارست زیر سطحی تأثیر بسزایی داشته باشد.

در محدوده‌ی پراو- بیستون وجود مجاری وسیع با آبدهی زیاد نشان‌دهنده‌ی مساعدت ژئومورفولوژی کارست ناحیه در درجه اول و سپس عواملی مانند ویژگی‌های لیتولوژی و عامل ارتفاع در تعیین درجه توسعه‌ی‌کارست است.با توجه به شرایط هیدرودینامیک دو محدوده‌ی مورد مطالعه و نیز تجزیه و تحلیل هیدرو شیمی آب‌چشمه‌ها، کارست پراو-بیستون توسعه‌یافته‌تر از کارست در تاقدیس قلاجه است.

منابع

- اداره کل‌شیلات استان‌کرمانشاه (۱۳۹۱). امکان‌سنجی پرورش ماهیان خاویاری. طرح تحقیقاتی.
- باقری، سجاد؛ مجتبی یمانی؛ منصور جعفربیگلو؛ حاجی کریمی؛ ابراهیم مقیمی (۱۳۹۴). بررسی توسعه‌یافتگی ویژگی‌های هیدرودینامیکی سامانه‌های کارستی با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدرو گراف (مطالعه موردی: آبخوان‌های کارستی حوضه رودخانه الوند)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. شماره ۳. پاییز ۱۳۹۴. صفحات ۳۴۶-۳۳۳.
- بهرامی، شهرام؛ محمدعلی زنگنه‌اسدی؛ حمزه رهبر (۱۳۹۲). بررسی نقش ژئومورفولوژی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز کنگیر، جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای. دوره ۳. شماره ۷. صفحات ۸۴-۷۱.
- تالی‌قهرودی، منیژه؛ طاهره جلیلیان؛ فرشاد علیجانی (۱۳۹۳). شناسایی سیستم جریان زیرزمینی کارستی در توده پراو- بیستون. استان کرمانشاه، فصلنامه بین‌المللی پژوهشی تحلیلی منابع آب و توسعه. سال دوم. شماره ۴. صفحات ۳۹-۲۷.
- جهانی‌بهبهانی، حمیدرضا (۱۳۷۲). نقش خطواره‌ها در کنترل جریان آب زیرزمینی در مناطق چین‌خورده کارستی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز. گروه زمین‌شناسی- آبشناسی.
- دشتی برمکی، مجید؛ محسن رضایی؛ جواد اشجاری (۱۳۹۴). پتانسیل‌یابی منابع آب کارست کوههای دوان و شاپور براساس تصمیم‌گیری چندمعیاره.مجله‌پژوهش آب ایران. شماره ۱. پیاپی ۱۶. صفحات ۱۰۰-۸۹.
- رنگزن، کاظم؛ احسان آبشیرینی (۱۳۸۴). بررسی نقش عوامل ساختاری، لیتولوژیکی و توپوگرافی در رخنمون چشمه‌های طاقدیس کارستی پابده-لالی، مجموعه مقالات بیست‌وسومین همایش زمین‌شناسی تهران.
- سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۱). نقشه‌های زمین‌شناسی کرند و ایلام. مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- سازمان نقشه‌برداری کشور (۱۳۹۱). نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰.
- قبادی، محمدحسین؛ یاسین عبدی‌لر؛ یزدان محبی (۱۳۹۰). اهمیت شناخت خصوصیات ژئومورفولوژیکی. سنگ‌شناسی و فیزیکی سنگ‌های کربناته. جهت ارزیابی توسعه کارست در منطقه نهاوند. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی. سال ۷. شماره ۴. صفحات ۳۱۰-۲۹۹.
- قدیمی، مهرنوش؛ حسن احمدی؛ ابراهیم مقیمی؛ منصور جعفربیگلو (۱۳۹۳). بررسی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی اشتران‌کوه در ارتباط با سازندهای زمین‌شناسی منطقه، نشریه مرتع وآبخیزداری. مجله منابع طبیعی ایران. دوره ۶۷. شماره ۲. صفحات ۲۷۸-۲۶۳.

- قمی‌اویلی، جعفر (۱۳۷۶). مطالعه لیتواستراتیگرافی و بررسی کارستی شدن رخنمون‌های کربناته منطقه نوا- قلاجه در غرب استان کرمانشاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران.
- کلانتری، نصرالله؛ محمدرضا کشاورزی؛ عباس چرچی (۱۳۸۸). عوامل مؤثر در ظهور چشمه‌های حوضه‌ی آبریز دشت ایذه، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی. سال ۵. شماره ۲. صفحات ۱۴۷-۱۳۵.
- کاظمی، رحیم؛ جعفر غیومیان؛ نادر جلالی (۱۳۸۵). بررسی نقش عوامل ساختاری در فراوانی منابع آب در منطقه کارستی لار با استفاده از سنجش از دور و GIS، مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی. دوره ۱۹. شماره ۷۳. صفحات ۴۱-۳۳.
- محمودی، فرج‌اله؛ امجد ملکی (۱۳۸۰) تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون-پرآو کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیایی.شماره ۴۰. مهرماه ۱۳۸۰. صفحات ۱۰۵-۹۳.
- مرادی، صمد؛ محسن رضایی؛ جهانگیر پرهمت (۱۳۸۹). بررسی تأثیر عوامل ساختاری، سنگ‌شناسی و توپوگرافی بر ظهور چشمه‌ها در محدوده شیراز تا یاسوج، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران ۲۱-۲۳ اردیبهشت. کرمانشاه.
- مقصودی، مهران؛ حاجی کریمی؛ فرشاد صفری؛ ذبیح‌الله چهارراهی (۱۳۸۸). بررسی توسعه کارست در توده پراو- بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی. پژوهش‌های جغرافیایی. دوره ۴۱. شماره ۶۹. صفحات ۶۵-۵۱.
- ملکی، امجد؛ محسن اویسی (۱۳۹۱) شناسایی ساختار گسلی و تحول چشمه‌های کارستی با استفاده از رادار نفوذی (مطالعه موردی استان کرمانشاه)، جغرافیا و پایداری محیط. دوره ۲. شماره ۳. صفحات ۱۰- ۱.
- ولایتی، سعداله؛ فریده خانعلی‌زاده (۱۳۹۱) بررسی ساختارهای تکتونیک و اشکال کارستی (مطالعه موردی حوضه آبریز کارده)، فصلنامه علمی- پژوهشی انجمن جغرافیای ایران. دوره جدید. سال نهم . شماره ۳۱. صفحات ۱۸۹- ۱۷۱.
- یمانی، مجتبی؛علی‌اکبر شمسی‌پور؛مریم جعفری‌اقدم؛ سجاد باقری‌سیدشکری (۱۳۹۰). بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP. استان کرمانشاه. علوم زمین. سال ۲۲. شماره ۸۸. صفحات ۶۶-۵۷.
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Mar Vias, J., Neukum, C., Sinreich, M., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hotzl, H., Jesuperles, M. & Zwahlen, F (2006). Karst Groundwater Protection: First Application of a Pan-European Approach to Vulnerability, Hazard and Risk Mapping in Thesierra De Libar (Southern Spain), Science of the Total Environment, 357, 54-73.
- Atalay, I (2003). Effects of the Tectonic Movements on the Karstification in Anatolia, Turkey, Acta Carsologica, 16, 196-203,
- Bakalowicz, M (2005). Karst Groundwater: a challenge for new resources., Hydrogeology Journal. 13 (1), 148-160.
- -Bonacci, O (1993). Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers, Hydrological Sciences, 38 (1), 51-62.
- Cooper, A. H., Farrant, A. R. & Price, j (2011). The use of karst Geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britabin,Geomorphology,134,118 -131
- -Fiorillo, F., Revellino, P., Ventafridda, G. (2012). Karst Aquifer Draining during Dry periods. Journal of Cave and Karst Studied, 74 (2), 48 – 156.
- Ford, D.,& Williams, P (2007). karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley & Sons, Ltd, 554 pp.

- llman, E (1980). Levaluation du regime des eaux souterraines dans les roches carbonatiques du Mesozoique des Carpates Occidentales par les courbes de tarissment des sources. Geologicky u stav Diony za S tura, Bratislava. Za padne Karpaty. Se r. hydrogeolo gia a inzinierska geolo gia 3. PP:7-9
- Malik, P. & Vojtkova, S. (2012). Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and it application in assessing over/underflow conditions in closely spaced karstic springs. Environmental Earth Sciences, 65, 2245-2257
- Maillet, E (1905). Essais d hydraulique Souteeraine et Fluvale. Paris: Hermann.
- Milanovic**,** P (1981). Karst Hydrogeology. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, 434 pp.
- Milanovic**,** P (2004). Water Resources Engineering in Karst, CRC Press, Boca London New York Washington,D.C, 328 pp.
- Mohammadi, Z. & Raeisi, E. & Bakalowicz, M (2007). From behaviour of the Asmari limestone aquifer at the Khersan 3 Dam site, southern Iran, Hydrological Sciences Journal, 52, 206-220.
- Gilli, E., Boudin , F., Longuevergne , L., Florsch , N., Walch, J, J., Gomes, A., Depeyre, J., & Marie, J, C(2010). Neotectonics & current hydrologically- induced Karst deformation . Case study of the plateau de Calern, (Alpes-Maritimes , France), Geodinamica Acta 23 (1), 34-64.
- Fiorillo, F., Revellino, P., Ventafridda, G. (2012). Karst Aquifer Draining during Dry periods. Journal of Cave and Karst Studied, 74 (2),148 – 156.
- Goldscheider,N. & Drew, D (2007). Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis Group , London , UK, 263 pp.
- Karimi, H., Raeisi, E. & Bakalowicz, M. (2005). Characterising the main Karst aquifers of the Alvand basin, Northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach, Hydrogeology Journal, 13 (6),787-799.
- Kresic, N. and Bonacci, (2010). "Spring discharge hydrograph. In Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability". Edited by N. Kresic and Z. Stevanovic, Elsevier Amsterdam, PP: 129-163.
- Kuhta, M., Brkić, Ž. and Stroj, A. (2012). "Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia". Geologia Croatica. 65 (1), 41-52.