

بررسی توسعه‌یافتگی و ویژگی‌های هیدرودینامیکی سامانه‌های کارستی با استفاده از

تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف

(مورد مطالعه: آبخوان‌های کارستی حوضه رودخانه الوند)

سجاد باقری سیدشکری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

مجتبی یمانی* - استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

منصور جعفری‌گللو - دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

حاجی کریمی - دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

ابراهیم مقیمی - استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۳/۱۷

چکیده

حوضه کارستی رودخانه الوند در غرب استان کرمانشاه به علت فراهم بودن شرایط مساعد کارست‌زایی، دارای آبخوان‌های کارستی متعددی است. این آبخوان‌ها نقش حیاتی در استمرار و شکل‌گیری مدنیت در منطقه داشته، منبع اصلی تأمین آب جوامع انسانی است. هدف از این پژوهش ارزیابی و تعیین درجه توسعه کارستی آبخوان‌های کارستی حوضه الوند استفاده از طریق تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های کارستی است. در این پژوهش، پس از تعیین محدوده آبخوان‌ها، ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارستی سطحی و زمین‌شناسی آنها بررسی شد و در ادامه منحنی فرود هیدروگراف پنج چشمه ارزیابی و درجه توسعه کارستی آنها تعیین شد. نتایج حاکی از آن است که آبخوان‌های ریجاب و ماراب با درجه توسعه کارستی ۵/۵، توسعه‌یافته‌ترین آبخوان‌های حوضه‌اند و دارای دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته‌اند. آبخوان‌های گلین، گلدره و سرابگرم دارای درجه توسعه کارستی ۳/۷، ۲/۷ و ۳/۷ هستند و دو زیررژیم خطی دارند. درجه توسعه کارستی و ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌ها تحت تأثیر تفاوت‌های محلی در عوامل مؤثر بر توسعه کارستی و ژئومورفولوژی کارستی متفاوت است. سه عامل ژئومورفولوژی کارستی سطحی، فیزیوگرافی حوضه‌های تغذیه‌کننده آبخوان‌ها و ارتفاع، به ترتیب بیشترین اثر را بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی و درجه توسعه کارستی آبخوان‌های حوضه الوند دارند.

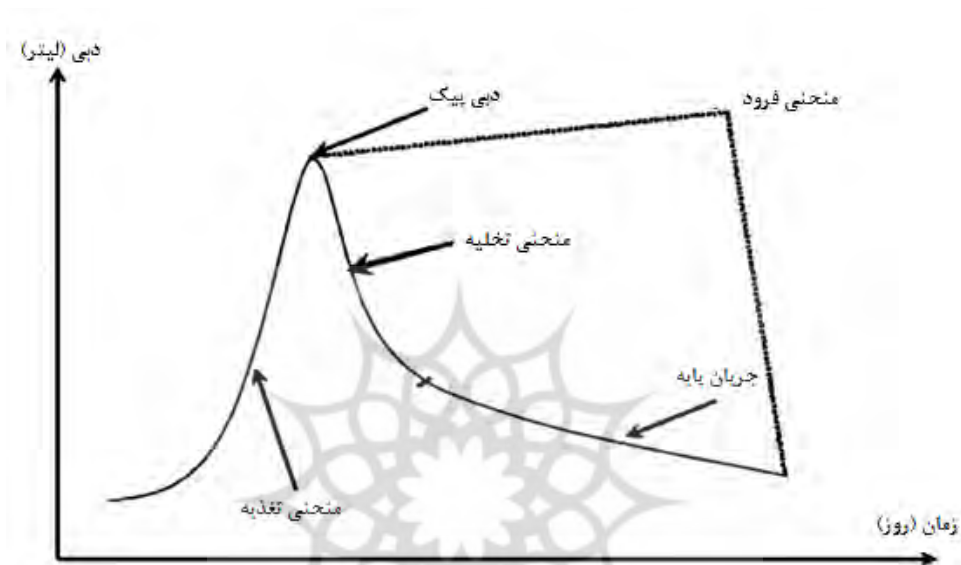
کلیدواژه‌ها: آبخوان کارستی، توسعه کارستی، حوضه الوند، ژئومورفولوژی، منحنی فرود هیدروگراف.

مقدمه

تفاوت در رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی و تمایز بین آنها واقعیتی پذیرفته‌شده است (سیویتا، ۲۰۰۸: ۸۵۶). پاسخ هیدروشیمیایی و هیدرودینامیکی مشاهده‌شده در سامانه‌های کارستی به شرایط جریان در آنها بستگی دارد. شرایط

جریان در سامانه کارستی به سلسله‌مراتب جریان، تنظیم خروجی و سازماندهی شبکه زهکشی در مناطق غیراشباع وابسته است که به وسیله ساختار سامانه کارستی تعیین می‌شود (لاستنت و مودرای، ۱۹۹۷: ۱۱۴). هیدروگراف چشمه‌ها بازتاب مستقیم همه فرایندهای فیزیکی است که در داخل آبخوان، جریان آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (کیوتا و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۱). شکل منحنی فرود تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله خواص هیدرودینامیکی آبخوان (مور، ۱۹۹۲: ۹۳)، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه‌ای آبریز (ایسنلور و همکاران، ۱۹۹۷: ۳۰۹)، ماهیت، ضخامت، توزیع فضایی و سطح اشباع خاک (لورپ و همکاران، ۱۹۹۸: ۱۴۹)، اقلیم و فصول سال قرار دارد. تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف روش مهمی در بررسی‌های هیدرولوژیکی است که برای تفسیر ویژگی آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود (کریشیچ و بوناچی، ۲۰۱۰: ۱۳۰). بررسی جریان فرود که در آن، قسمت فرود انتهای هیدروگراف منطبق با تخلیه آبخوان است، اطلاعاتی را در زمینه ساختار و عملکرد آبخوان به‌ویژه شاخص‌های هیدرودینامیکی مانند نفوذپذیری و ذخیره‌سازی به‌دست می‌دهد (تراخ و همکاران، ۱۹۹۳: ۲۲۸). از مزیت‌های مهم تجزیه و تحلیل منحنی فرود، محاسبه مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی متناسب به سازوکارهای زهکشی مانند ضریب‌های فرود، حجم دبی اولیه، مجموع کل جریان سریع و پایه و شناسایی زیررژیم‌هاست (مالیک و وجتکوا، ۲۰۱۲: ۲۲۴۶). شناخت ویژگی‌های جریان پایه و پیش‌بینی آن در طول دوره خشک برای تعیین مقدار ذخیره آبخوان و امکان بهره‌برداری از آن به‌منظور مصرف‌های مختلف و همچنین برآورد مقدار آسیب‌پذیری آبخوان از آلودگی لازم است (دواندل و همکاران، ۲۰۰۳: ۲۴۹). آبخوان‌های کارستی منبع بارزش آب در مناطق وسیعی از جهان‌اند که با کاهش کمیت و کیفیت آب آبخوان‌های آبرفتی، اهمیت آنها در جایگاه منبعی راهبردی دوچندان شده است (سیویتا، ۲۰۰۸: ۸۵۶). آبخوان‌های کارستی حوضه الوند تأمین‌کننده آب مصرفی هشتاد هزار خانوارند (کریمی و همکاران، ۲۰۰۵: ۷۷۸) و جریان پایه رودخانه الوند و قسمت اعظم آب مورد نیاز بخش‌های کشاورزی و صنعت و بوم‌سازگان‌های طبیعی منطقه نیز به وجود این آبخوان‌ها وابسته است. با توجه به افزایش تقاضای آب و تأثیر حیاتی آن بر توسعه، گسترش فعالیت‌های انسانی در حوضه‌های تغذیه‌کننده آبخوان‌ها و رخداد نوسان‌های بارشی، شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی و میزان توسعه‌یافتگی سامانه کارستی آبخوان‌ها برای بهره‌برداری بهینه و حفظ کیفیت و کمیت منابع آب کارست در حوضه الوند، برای مدیریت علمی منابع آب نیاز مبرمی است. هدف از این پژوهش، ارزیابی میزان توسعه‌یافتگی و شناخت رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی حوضه الوند و عوامل مؤثر بر آنها با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف است. تجزیه و تحلیل منحنی فرود، ابزار اساسی در تحقیقات هیدروژئولوژیکی بوده، دارای سابقه‌ای بیش از یک سده است (بوسی‌نسک، ۱۸۷۷؛ مای‌یه، ۱۹۰۵) و در یک سده گذشته، توسعه یافته و محققان مختلف آنها را ارزیابی و از آنها استفاده کرده‌اند (هورتون، ۱۹۳۳؛ کوپر و رورابوق، ۱۹۶۳؛ دروگ، ۱۹۶۷؛ پادایلا و همکاران، ۱۹۹۴؛ گریفیس و کلوزن، ۱۹۹۷؛ کواج، ۲۰۰۳؛ کریشیچ و بوناچی، ۲۰۱۰؛ مالیک و وجتکوا، ۲۰۱۲). منحنی فرود هیدروگراف منعکس‌کننده ویژگی‌های جریان در آبخوان است. جریان آشفته (سریع) توسط سامانه مجرای رخ می‌دهد و جریان خطی (پایه) را آب نفوذی از ماتریکس و حجم ذخیره دینامیکی تأمین می‌کند (پادایلا و همکاران، ۱۹۹۴: ۲۶۹). شکل ۱ اجزای یک هیدروگراف را طی رخدادی بارشی نشان می‌دهد. منحنی بالارونده مشخصه مرحله اول جریان است و افزایش دبی در آن به عوامل زیادی از قبیل شدت بارش، پوشش سطوح کارستی، وجود فروچاله‌ها یا سطوح کارستی

فاقد پوشش و نوع شبکه زهکشی وابسته است. قسمت دوم دبی، پیک است که در چشمه‌های مختلف مقدار و مدت آن متفاوت است. قسمت سوم، منحنی فرود است که کاهش تدریجی دبی را توصیف می‌کند و دارای دو بخش است؛ در بخش اول، دبی به سرعت کاهش می‌یابد و در بخش دوم، دبی به‌کندی کاهش می‌یابد. بخش اول منحنی فروکش نشان‌دهنده تأمین دبی از زون غیراشباع آبخوان کارستی است که به‌طور مستقیم از بارش تأمین می‌شود و از راه مجراها تخلیه می‌شود. بخش دوم نیز نشان‌دهنده سهم شکاف‌ها و مناطق با نفوذپذیری کمتر است و دبی از منطقه اشباع تأمین می‌شود.



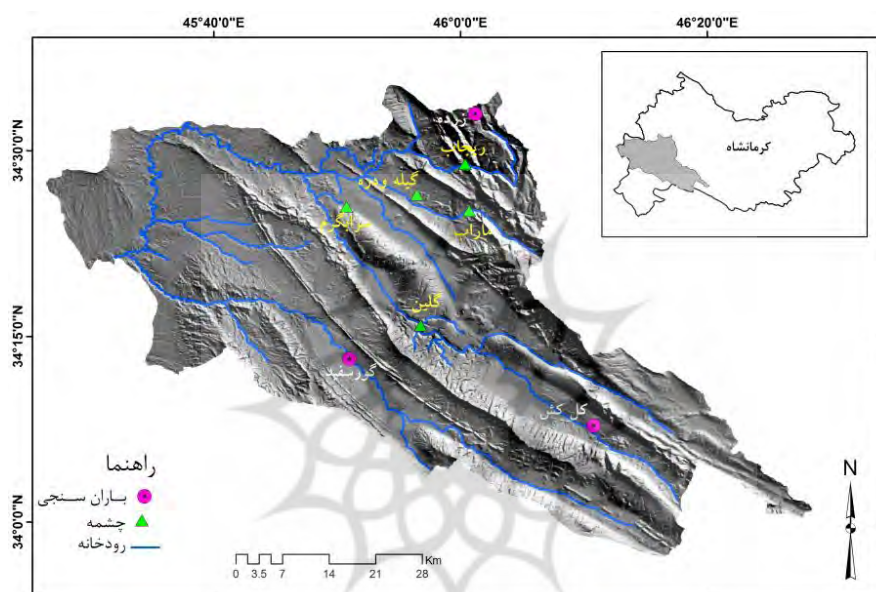
شکل ۱. روند شماتیک از تابع تخلیه یک چشمه در رویدادی بارشی با سه زیربخش مختلف (سیویتا، ۲۰۰۸)

موقعیت منطقه پژوهش

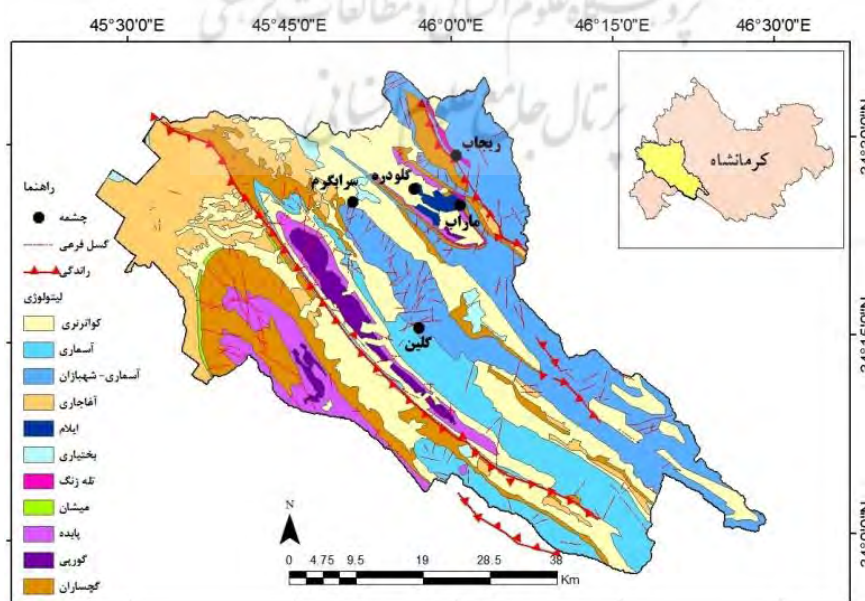
حوضه رودخانه لوند در غرب و جنوب غربی استان کرمانشاه بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳°۳۳' و ۳۴°۳۴' و طول‌های جغرافیایی ۴۶°۴۵' و ۴۷°۴۸' واقع شده است. مساحت این حوضه ۲۶۵۶ کیلومتر مربع و بیشینه ارتفاع آن ۲۳۵۵ متر در ارتفاعات دالاهو و قلاجه و کمینه ارتفاع آن ۲۱۲ متر در خروجی حوضه است (شکل ۲). از نظر ژئومورفولوژی، این حوضه مشتمل بر تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موازی با روند شمال غربی - جنوب شرقی است و آبخوان‌های کارستی، منطبق بر تاقدیس‌های حوضه است. از نظر توپوگرافی، قسمت‌های مرتفع حوضه در شمال و شرق حوضه قرار گرفته و قسمت‌های غربی حوضه دارای ارتفاع کمتر از ۸۰۰ متر است. حوضه لوند در زون چین‌های برگشته زاگرس چین‌خورده واقع شده است. بیشتر تاقدیس‌های حوضه در رده تاقدیس‌های کشیده قرار گرفته، دارای راندگی در یال جنوبی خود است. گسل‌های اصلی منطقه از نوع برشی بوده، در جهت شمال غرب - جنوب شرقی امتداد یافته است و شیب آنها با زاویه باز به سمت شمال شرقی است (قمی اوپلی، ۱۳۷۶: ۷۱). سازندهای زمین‌شناسی در این حوضه، از جدید به قدیم

1. Falling curve
2. Depletion curve

عبارت‌اند از: آبرفت‌های کوتاه‌تری، کنگلومرای بختیاری، سازند آغاچاری (مارن و ماسه‌سنگ)، سازند گچساران (گچ و مارن)، سازند آسماری (آهک دولومیتی و دولومیت)، سازند آسماری شهبازان (آهک و دولومیت)، سازند پایده و گورپی (مارن و شیل با بین لایه‌های سنگ آهک مارنی)، سازند ایلام (آهک) (شکل ۳). حدود ۳۸ درصد از مساحت حوضه الوند از سازندهای کربناته آسماری- شهبازان، آسماری و ایلام تشکیل شده است. اقلیم منطقه، مدیترانه‌ای و دارای دو فصل خشک و مرطوب منطبق بر دوره سرد و گرم سال است. دما تحت تأثیر عامل ارتفاع است و دمای سالانه بین ۶ درجه در ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر تا ۲۱ درجه در ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر در نوسان است. بارش نیز تحت تأثیر عامل ارتفاع، دارای پراکنش یکسانی در حوضه نیست و نواحی شرقی و شمالی حوضه که مرتفع‌تر است، بارش بیشتری دارد (جدول ۱).



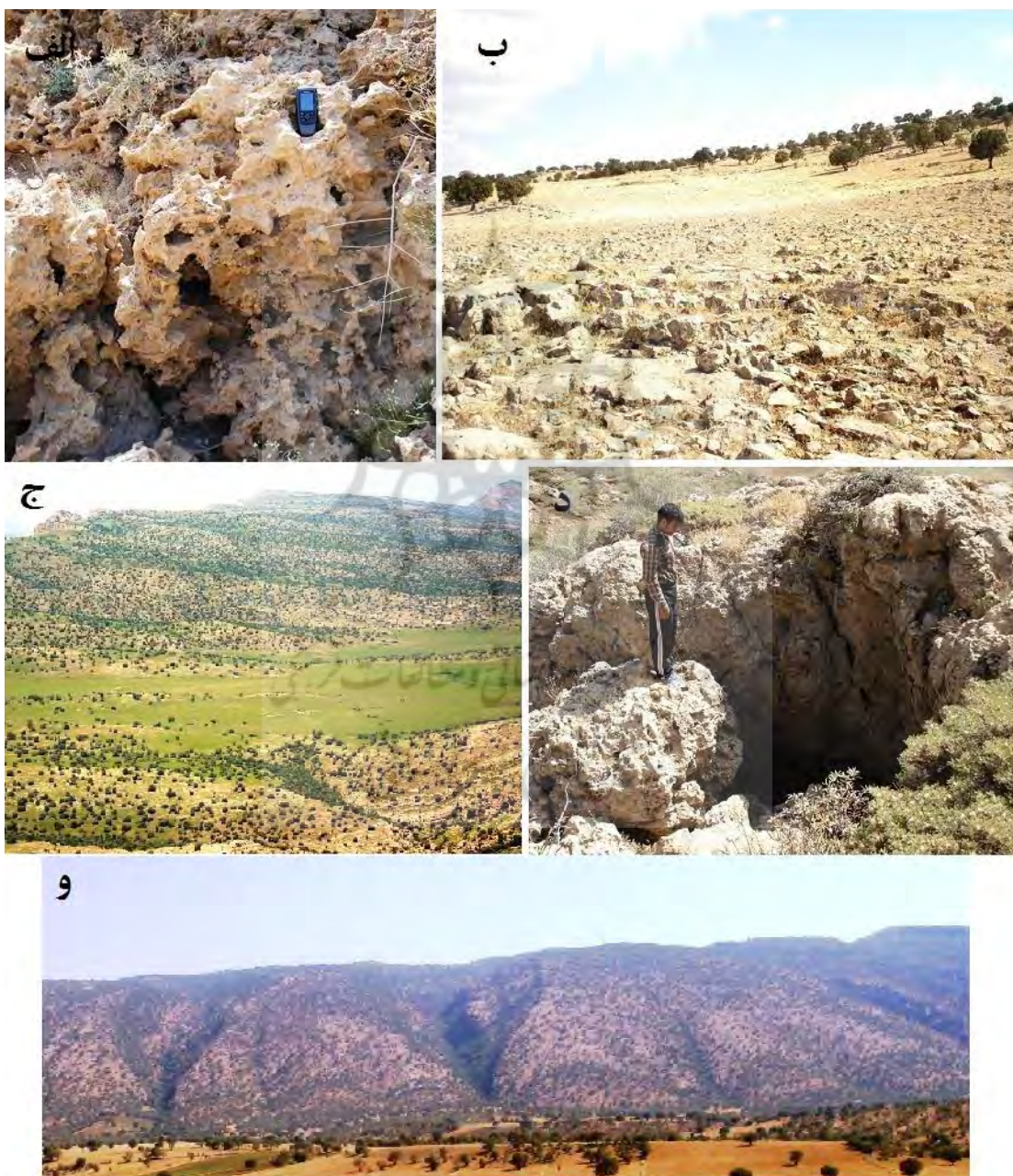
شکل ۲. موقعیت حوضه بررسی شده در غرب استان کرمانشاه



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی حوضه رودخانه الوند

جدول ۱. ویژگی‌های بارش حوضه بررسی شده

ایستگاه	ارتفاع (متر)	دوره آماری ۱۳۸۸-۱۳۶۸	بارش میانگین (میلی‌متر)	بارش بیشینه (میلی‌متر)	بارش کمینه (میلی‌متر)
زرده	۱۱۲۰	۱۳۸۸-۱۳۶۸	۶۱۷	۹۳۰	۳۶۵
گورسفید	۶۵۰	۱۳۸۸-۱۳۶۷	۴۲۶	۶۳۱	۱۸۲
کل کش	۱۱۵۰	۱۳۸۸-۱۳۷۶	۵۱۴	۷۳۱	۲۷۱



شکل ۴. الف) نمایی از کارن‌های حفره‌ای؛ ب) سنگفرش کارستی؛ ج) پلژه؛ د) جاما؛ و) دره‌های کارستی

به علت فراهم بودن شرایط کارست‌زایی، لندفرم‌های کارستی متنوعی در این حوضه شکل گرفته است؛ اما به دلیل تفاوت در متغیرهای کارست‌زایی از جمله توپوگرافی، تکتونیک، اقلیم، لیتولوژی و شرایط ژئومورفولوژیکی، میزان توسعه کارست در نواحی مختلف حوضه یکسان نیست. کارن‌ها، فراوان‌ترین لندفرم کارستی در حوضه‌اند (شکل ۴الف). غارها نیز از فراوان‌ترین لندفرم‌های کارستی بوده که در امتداد سطوح لایه‌بندی یا درزه‌ها در تاقدیس‌های حوضه شکل گرفته‌اند. در رأس تاقدیس‌های قلاجه، نواکوه و دالاهو پهنه‌های کارستی (شکل ۴ب) و پلزه‌ها (شکل ۴ج) قابل شناسایی است. براساس بازدیدهای میدانی، سینک‌هول‌ها (شکل ۴د) در این حوضه تنها در رأس تاقدیس دالاهو و نواکوه شکل گرفته‌اند. دره‌های عمیق و خشک کارستی (شکل ۴و) به صورت دره‌های نزولی بر یال تاقدیس‌های حوضه توسعه یافته، بارزترین لندفرم کارستی در حوضه‌اند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش مبتنی بر روش‌های کتابخانه‌ای، میدانی و تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف است و در آن از داده‌های کمی و کیفی ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی وزارت نیرو (ماهانه) در دوره آماری ۱۳۷۸-۱۳۸۹ استفاده شده است. از روش کریمی (۲۰۰۳) $A=Q/P.I$ برای تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌ها استفاده شده است. ضریب تغییرات دبی چشمه‌ها با رابطه $CV=(S/x)*100$ محاسبه می‌شود که در آن، S انحراف معیار دبی و x میانگین دبی سالانه است. برای ارزیابی منشأ کارستی بودن و تعیین نوع آب آبخوان‌های این پژوهش، از داده‌های به‌دست‌آمده در دوره کم‌آبی استفاده شد (جدول ۴). با توجه به عدم توسعه یکسان کارست و همچنین تفاوت‌های لیتولوژیکی سازندهای کربناته و شرایط ژئومورفولوژی، اقلیمی و توپوگرافی متفاوت در قسمت‌های مختلف حوضه، پنج آبخوان ریجاب، ماراب، گلین، سراب‌گرم و گلودره (شکل ۵) به‌منظور ارزیابی سطح توسعه کارستی انتخاب شد. از تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف برای ارزیابی نوع سامانه جریان در آبخوان‌های کارستی استفاده شد. در هر آبخوان کارستی ممکن است چندین زیررژیم خطی و آشفته وجود داشته باشد و هیدروگراف چنین نظامی را می‌توان با انطباق چندین معادله مربوط توضیح داد. منحنی فرود به‌صورت نیمه‌لگاریتمی ترسیم می‌شود و دبی برحسب لیتر بر ثانیه در برابر زمان برحسب روز ترسیم می‌شود. منحنی فرود شامل دوره زمانی بین دبی پیک بیشینه تا زمان افزایش مجدد دبی در پایان دوره منحنی فرود است (مالیک و وجتکوا، ۲۰۱۲: ۲۲۴۷). برای محاسبه زیررژیم خطی و آشفته به‌ترتیب از روابط ۱ و ۲ استفاده می‌شود؛ رابطه ۱ تابع نمایی است که فورکاسویچ و پالوک (۱۹۶۷) برای جریان خطی پیشنهاد کردند و رابطه ۲ تابع خطی است که کولمان (۱۹۸۰) برای جریان آشفته بیان کرد:

$$1. \quad Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{در این معادله } Q_t \text{ آبدی در زمان } t \text{ (مترمکعب/ثانیه)، } Q_0 \text{ آبدی قبلی در زمان } 0, e \text{ پایه}$$

لگاریتم طبیعی و α ضریب فروکش چشمه است که براساس روش مایلر محاسبه می‌شود.

$$2. \quad Q_t = Q_0 (1 - \beta t) \quad \text{در این معادله } Q_t \text{ آبدی در زمان } t \text{ (مترمکعب/ثانیه)، } Q_0 \text{ آبدی قبلی در زمان } 0 \text{ و } \beta$$

ضریب فروکش در جریان آشفته است که برابر با شیب منحنی فروکش است و t مدت‌زمان افت منحنی فروکش است.

برای به‌کارگیری این روش، به دوره‌های طولانی آمار دبی نیاز است تا وقایع ناگهانی که موجب اختلال در منحنی فرود در یک سال یا چند سال می‌شود، شناسایی شود و برآورد واقعی از درجه توسعه‌یافتگی آبخوان انجام گیرد. بر این اساس، منحنی فرود ده‌ساله هریک از چشمه‌های محدوده این پژوهش، ترسیم و با برازش یک خط بین آنها منحنی نماینده دوره آماری ده‌ساله چشمه‌ها ترسیم شد؛ این منحنی مبنای ترسیم منحنی تاریسمان چشمه‌هاست. پس از ترسیم منحنی تاریسمان هر چشمه و محاسبه رابطه منحنی فرود آن براساس روش مالیک و وجتکوا (۲۰۱۲) درجه توسعه کارست آبخوان‌های کارستی محاسبه شد (جدول ۲). درنهایت، نتایج تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف با مد نظر قرار دادن ویژگی‌های لیتولوژیکی و ژئومورفولوژی کارست آبخوان‌ها ارزیابی و ویژگی‌های هیدرودینامیکی این آبخوان‌ها تحلیل شد.

جدول ۲. درجه توسعه کارست آبخوان‌ها براساس محاسبه معادله منحنی فرود (مالیک و وجتکوا، ۲۰۱۲)

درجه توسعه کارست	نوع زیررژیم‌های جریان آب زیرزمینی	مشخصه‌های رابطه منحنی فرود	مشخصه‌های مؤلفه‌های منحنی فرود	مشخصه‌های درجه کارستی شدن
۰/۵ ۱	یک زیررژیم با مقادیر کم	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha t}$	$i_1 < 0.001$ $i_1 = 0.001 - 0.0025$	مناطق خردشده گسلی با و گردش عمقی آب
۲ ۲/۳	یک زیررژیم با مقادیر زیاد	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha t}$	$i_1 > 0.007$ $i_1 = 0.0025 - 0.007$	مناطق تکتونیزه گسلی با نفوذپذیری زیاد
۲/۵ ۲/۷ ۳	دارای دو یا چند زیررژیم خطی با مقادیر کم	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t}$	$i_1 < 0.0024$ $i_2 < 0.033$ $i_1 = 0.0024 - 0.0045$ $i_2 = 0.033 - 0.067$	آبخوان‌های با غلبه درزه و شکاف‌های کوچک
۳/۵ ۳/۷ ۴	دارای دو یا چند زیررژیم خطی با مقادیر زیاد	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t}$	$i_1 = 0.0024 - 0.0043$ $i_2 = 0.06 - 0.16$ $i_1 > 0.0043$ $i_2 < 0.06$ $i_1 = 0.0041 - 0.018$ $i_1 = 0.055 - 0.016$	توسعه نامنظم آبخوان، غلبه شکاف‌های بزرگ و وجود مجراهای کوچک
۴/۳ ۴/۷ ۵	دارای زیررژیم‌های آشفته و خطی که غلبه با جریان خطی است.	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_0 + (1 - i_1)t$	$i_1 > 0.018$ $i_1 > 0.16$ با مقادیر کم	آبخوان تکتونیزه (گسل) شبکه متراکم درزه‌ها و وجود مجراها
/	دارای یک زیررژیم آشفته و دو زیررژیم خطی	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t} + Q_0 + (1 - i_1)t$	$i_1 > 0$ $i_2 > 0$ $i_1 > 0$	درزه و شکاف‌های بسیار متراکم با بازشدگی زیاد و وجود مجراهای بزرگ

ادامه جدول ۲. درجه توسعه کارست آبخوان‌ها براساس محاسبه معادله منحنی فرود (مالیک و وجتکوا، ۲۰۱۲)

مشخصه‌های درجه کارستی شدن	مشخصه‌های مؤلفه‌های منحنی فرود	مشخصه‌های رابطه منحنی فرود	نوع زیررژیم‌های جریان آب زیرزمینی	درجه توسعه کارست
درزه و شکاف‌های بسیار متراکم با بازشدگی زیاد و وجود مجراهای بزرگ	با مقادیر بالا	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t} + Q_{04} + (1 - \alpha_1)t + Q_{05} + (1 - \alpha_2)t$	دارای دو زیررژیم آشفته و دو زیررژیم خطی و غلبه زیررژیم‌های خطی در تخلیه	
آبخوان توسعه یافته، وجود درزه و شکاف‌های بسیار بزرگ ناشی از تکتونیزه شدن و مجراهای بزرگ	با مقادیر زیاد $\alpha_1 > \alpha_2$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_{04} + (1 - \alpha_1)t + Q_{05} + (1 - \alpha_2)t + Q_{06} + (1 - \alpha_3)t$	یک زیررژیم خطی و دو یا سه زیررژیم آشفته، رژیم خطی کارکرد اصلی را در تخلیه دارد.	
آبخوان با توسعه زیاد کارستی، وجود مجراهای بزرگ و کاهش اثر درزه و شکاف‌ها بر تخلیه	با مقادیر زیاد	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_{04} + (1 - \alpha_1)t + Q_{05} + (1 - \alpha_2)t + Q_{06} + (1 - \alpha_3)t$	یک زیررژیم خطی و دو یا سه زیررژیم آشفته، رژیم آشفته عامل اصلی تخلیه است.	
آبخوان کارستی با سامانه مجرای به خوبی توسعه یافته	$\alpha_2, \alpha_1 > 0$ $\alpha_1 > 0$	$Q_t = Q_{04}(1 - \alpha_1)t$	وجود یک جریان آشفته و تخلیه وابسته به منطقه وادوز است.	/
آبخوان کارستی با سامانه مجرای به خوبی توسعه یافته و ارتباط کم با منطقه فراتیک	α_2 و α_1 مقادیر کم	$Q_t = Q_{04} + (1 - \alpha_1)t + Q_{05} + (1 - \alpha_2)t$	دارای دو زیررژیم آشفته	
آبخوان کارستی با سامانه مجرای به خوبی توسعه یافته و تخلیه از منطقه وادوز	α_3 و α_2 و α_1 مقادیر زیاد	$Q_t = Q_{04} + (1 - \alpha_1)t + Q_{05} + (1 - \alpha_2)t + Q_{06} + (1 - \alpha_3)t$	دارای سه زیررژیم آشفته متفاوت	

یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی آبخوان‌ها

نوع تغذیه آبخوان‌های محدوده این پژوهش، به علت عدم رخنمون سازندهای دیگر در سطح تاقدیس‌ها و جاری نشدن آب از سطح سازندهای غیر کارستی از نوع خودزا^۱ است. در آبخوان‌های گلین، سراب گرم و گلودره تغذیه به صورت منتشر (افشان) و از راه کارن‌ها، درزه‌ها و شکاف‌ها انجام می‌گیرد. دره‌ها و پهنه‌های کارستی نیز کارکرد مهمی در تغذیه این آبخوان‌ها دارد. در آبخوان‌های ریجاب و ماراب، تغذیه به دو صورت منتشر از راه کارن‌ها، درزه‌ها و شکاف‌ها و متمرکز از

راه سینک‌هول‌ها انجام می‌گیرد. پلزه‌های رأس تاق‌دیس نواکوه و دالاهو با داشتن فروچاله، به‌صورت متمرکز این دو آبخوان را تغذیه می‌کند و تغذیه‌ی منتشر در دره‌های خشک و در کارن فیلدها صورت می‌گیرد. حوضه‌ی آبرگیر چشمه‌های ماراب، ریجاب و سراب‌گرم از سازند آسماری-شهبازن و حوضه‌ی آبرگیر چشمه‌های گلین و گلودره به‌ترتیب از سازندهای آسماری و ایلام پوشیده شده است. مساحت حوضه‌ی آبرگیر چشمه‌های محدوده‌ی این پژوهش، براساس داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی دوره‌ی آماری ۱۳۷۸-۱۳۸۹ برآورد شد (جدول ۳) و این امر نشان‌دهنده‌ی تأثیر مستقیم مساحت حوضه‌ی آبرگیر بر مقدار دبی است. چشمه‌های ریجاب و گلودره به‌ترتیب بیشتری و کمترین دبی را دارد و بررسی ضریب تغییرات دبی چشمه‌ها نشان می‌دهد که چشمه‌ی ریجاب بیشترین و چشمه‌ی گلودره کمترین ضریب تغییرات را دارد. همه‌ی چشمه‌های محدوده‌ی این پژوهش دارای آب بی‌کربناته است و از منظر کاتیونی، کاتیون غالب کلسیم و پس از آن منیزیم است. همه‌ی چشمه‌ها رخساره‌ی کلسیک و منیزیک دارد. از منظر آنیونی، یون بی‌کربنات در همه‌ی چشمه‌ها غالب است و توالی آنیونی ریجاب، ماراب و گلین $HCO_3 > SO_4 > Cl$ گلودره و سراب‌گرم $HCO_3 > Cl > SO_4$ است (جدول ۴). هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی به‌طور معمول کمتر از ۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر است. چشمه‌ی گلودره و ماراب به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار هدایت الکتریکی را دارد. نوع آب، رخساره‌ی کاتیونی، توالی آنیونی و مقدار هدایت الکتریکی چشمه‌های محدوده‌ی این پژوهش، معرف کارستی بودن آنهاست. نسبت مولار منیزیم به کلسیم نشان‌دهنده‌ی ماندگاری بیشتر آب در آبخوان و معرف جنس سازند تغذیه‌کننده‌ی چشمه است. این نسبت در چشمه‌های بررسی‌شده، بین ۱/۱۷ تا ۱/۵۲ است و این افزایش غلظت منیزیم و کاهش نسبت منیزیم به کلسیم حاکی از ماندگاری زیاد آب در آبخوان‌هاست و نشان‌دهنده‌ی سنگ آهک دولومیتی در منطقه‌ی تغذیه‌ی چشمه‌هاست.

جدول ۳. ویژگی‌های هیدرولوژیکی و توپوگرافیکی چشمه‌های محدوده‌ی این پژوهش

چشمه	میانگین ارتفاع (m)	ضریب تغییرات	دبی کمینه (l/s)	دبی بیشینه (l/s)	دبی میانگین (l/s)	مساحت حوضه‌ی آبرگیر (km ²)
ریجاب	۱۸۷۶	۳۷/۹٪	۸۱۸	۴۷۴۰	۲۱۵۰	۱۹۸
سراب‌گرم	۱۱۹۱	۱۷٪	۶۱۵	۲۴۵۸	۱۶۲۵	۱۷۰
گلین	۱۵۲۶	۲۶/۱٪	۲۳۷	۸۹۱	۴۶۲	۶۴
گلودره	۱۱۴۳	۱۳/۷٪	۵۰	۲۹۹	۱۷۸	۱۸
ماراب	۱۸۹۴	۳۴٪	۲۴۷	۱۷۸۷	۵۶۱	۴۰

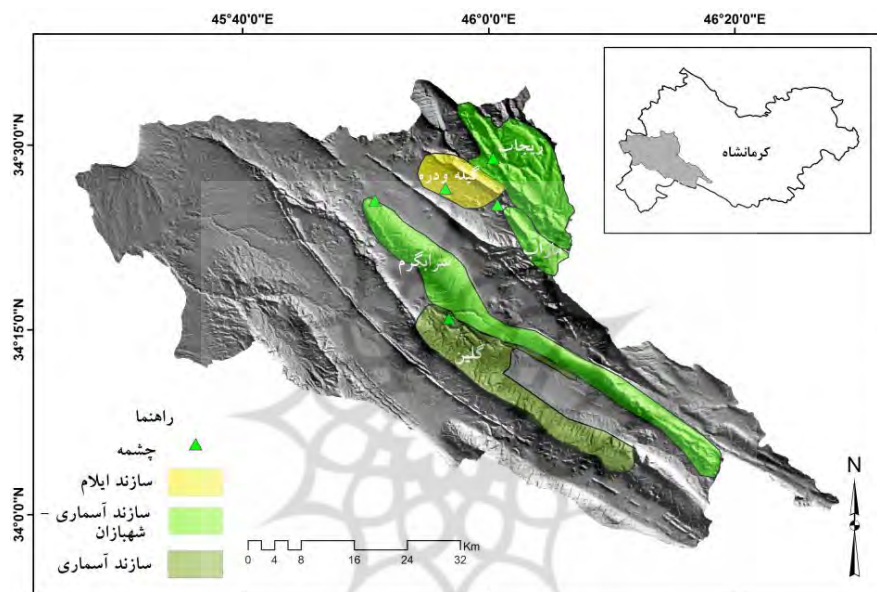
جدول ۴. ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های محدوده این پژوهش

هدایت الکتریکی	منیزیم/ کلسیم	توالی آنیونی	رخساره کاتیونی	نوع آب	تاریخ نمونه‌برداری	چشمه
۴۲۰	/	HCO ₃ >SO ₄ >Cl	کلسیک منیزیک	Ca° Mg° HCO ₃	۸۴/۸/۲۲	ریجاب
۴۲۰	/	HCO ₃ >Cl>SO ₄	کلسیک منیزیک	Ca° Mg° HCO ₃	۸۹/۸/۲	سراب گرم
۴۱۷	۱/۱۷	HCO ₃ >SO ₄ >Cl	کلسیک منیزیک	Ca° Mg° HCO ₃	۹۰/۸/۲	گلین
۵۰۱	۱/۵۲	HCO ₃ >Cl>SO ₄	کلسیک منیزیک	Ca° Mg° HCO ₃	۸۹/۸/۲	گلودره
۳۹۷	۱/۵۱	HCO ₃ >SO ₄ >Cl	کلسیک منیزیک	Ca° Mg° HCO ₃	۸۹/۸/۲	ماراب

تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف

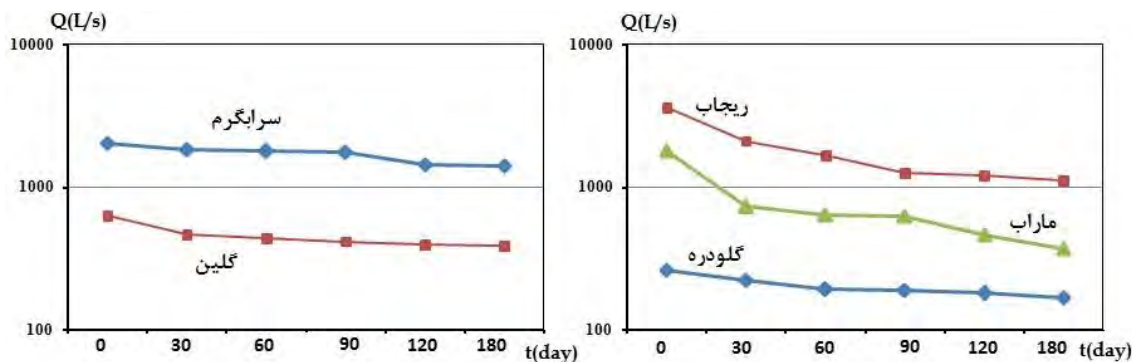
ارزیابی منحنی فرود چشمه ریجاب (شکل ۶الف) وجود دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته را نشان می‌دهد و رابطه منحنی فرود آن $Q_t = 2/1e^{-t/0.08} + 1/25e^{-t/0.17} + 510(1 - 0/29t)$ است. براساس جدول ۳، درجه توسعه شبکه کارست درونی آبخوان ریجاب، ۵/۵ است و در آن، مقادیر و بزرگ‌تر از صفر است. در این آبخوان، جریان خطی (پایه) غلبه دارد؛ اما قسمتی از آب خروجی چشمه را جریان آشفته (سریع) در مدت‌زمان کوتاهی نسبت به جریان خطی تخلیه می‌کند. از مشخصات این گونه آبخوان‌ها، فراوانی درزه‌ها و شکاف‌ها با توسعه و بازشدن زیاد و همچنین وجود مجراهای کارستی است. جریان سریع در آبخوان ریجاب را عمدتاً تغذیه متمرکز از راه فروچاله‌ها، درزه‌ها و شکاف‌های بزرگ تأمین می‌کند و مجراهای موجود در آبخوان، آن را تخلیه می‌کند. درواقع، توسعه ژئومورفولوژی سطحی کارست در آبخوان ریجاب و وجود فروچاله‌ها عامل اصلی درجه توسعه کارست و رفتار هیدرودینامیکی این آبخوان است. چشمه سراب گرم براساس رابطه منحنی فرود $Q_t = 2/0.1e^{-t/0.17} + 1/25e^{-t/0.32}$ دارای دو زیررژیم خطی با مقادیر متفاوت از دبی و مقادیر کم ضریب است (شکل ۶) و بر این اساس، دارای درجه توسعه کارست ۲/۷ است. در این آبخوان، شبکه درزه‌ها و شکاف‌ها متراکم و منظم است؛ اما از نظر بازشدگی، توسعه زیادی نیافته است؛ بنابراین تغذیه منتشر، در امتداد درزه‌ها رخ داده و این امر سبب غلبه جریان پایه در آبخوان سراب گرم شده است. بررسی نقشه زمین‌شناسی حوضه آبخیز چشمه سراب گرم حاکی از تکتونیزه بودن آن است. با توجه به شرایط مساعد خاکزایی، برخی از درزه‌ها و شکاف‌ها را خاک پر کرده و این امر مقدار نفوذپذیری را در امتداد آنها کاهش داده است. همچنین، به علت عدم توسعه ژئومورفولوژی کارست سطحی و کشیده بودن حوضه آبخیز چشمه سراب گرم (شکل ۵) آب‌های نفوذی به آبخوان، به تدریج تخلیه شده و این امر به کاهش دبی پیک منجر شده است. چشمه گلین دارای دو زیررژیم خطی است و رابطه منحنی فرود آن $Q_t = 0/62e^{-t/0.17} + 0/46e^{-t/0.17}$ است (شکل ۴) که حاکی از درجه توسعه کارست ۳/۷ و مقادیر متفاوت ضریب و

آبدهی چشمه است و در آن، غلبه با جریان خطی (پایه) است. این نوع آبخوان‌ها دارای شبکه درزه‌ها و شکاف‌های متراکم با توسعه نامنظم است و بیشتر درزه‌ها بازشدگی دارد و همچنین، مجراهای کوچک در این نوع آبخوان‌ها وجود دارد. حوضه آبرگیر چشمه گلین در ارتفاعات قلاجه واقع شده و ژئومورفولوژی کارست سطحی آن به صورت کارن‌های توسعه‌یافته و همچنین پلزه‌های کارستی است و این امر سبب توسعه‌یافته‌تر بودن سامانه کارستی این آبخوان نسبت به آبخوان سراب‌گرم شده است. چشمه گلین نیز دارای حوضه تغذیه‌ای به نسبت کشیده‌ای است (شکل ۵) که بر کاهش مقادیر ضریب و کاهش دبی بیک مؤثر است.



شکل ۵. نقشه حوضه تغذیه‌کننده آبخوان‌های بررسی شده

رابطه منحنی فرود چشمه گلودره به صورت $Q_t = 0.263e^{-0.009t} + 0.175e^{-0.01t}$ است. تجزیه و تحلیل منحنی فرود چشمه گلودره (شکل ۶) نشان داد که این چشمه دارای دو زیررژیم خطی با مقادیر متفاوت ضریب است و درجه توسعه کارست آن ۳/۷ است. در آبخوان گلودره، غلبه با جریان پایه است و تغذیه آن به صورت منتشر و از راه درزه‌ها و شکاف‌های نامنظم و توسعه‌یافته است. همچنین، مجراهای کوچک به صورت محدود در این آبخوان وجود دارد. ارزیابی منحنی فرود (شکل ۶) و رابطه آن $Q_t = 0.725e^{-0.02t} + 0.62e^{-0.008t} + 285(1 - 0.37t)$ در چشمه ماراب نشان‌دهنده وجود دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته است و درجه توسعه کارست آن ۵/۵ است. در آبخوان ماراب، غلبه با جریان خطی (پایه) است؛ اما جریان آشفته (سریع) نیز در آبخوان وجود دارد. تغذیه آبخوان از راه درزه‌ها و شکاف‌های بسیار بزرگ و فروچاله‌ها موجب جریان سریع می‌شود و آن را مجراها تخلیه می‌کند. بیشتر تغذیه جریان پایه را درزه‌ها و شکاف‌های کوچک‌تر و ماتریکس صورت می‌دهد. ژئومورفولوژی توسعه‌یافته کارست سطحی و وجود فروچاله‌ها جایگاه مهمی در ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان ماراب دارد.



شکل ۶. منحنی فرود چشمه‌های محدوده این پژوهش

نتیجه‌گیری

ارزیابی نوع آب، توالی آنیونی، مقدار هدایت الکتریکی و نسبت منیزیم به کلسیم، تأییدکننده منشأ کارستی آبخوان‌های محدوده این پژوهش است. تفاوت‌های محلی در عوامل مؤثر بر توسعه کارست همچون لیتولوژی، زمین‌ساخت، اقلیم، ارتفاع، شیب و همچنین ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه‌های تغذیه‌کننده آبخوان‌های کارستی در حوضه الوند موجب تفاوت در درجه توسعه کارست و رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های این حوضه شده است. آبخوان‌های ماراب و ریجاب دارای درجه توسعه کارستی ۵/۵ و دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته است. آبخوان‌های گلین و گلودره دارای دو زیررژیم خطی با مقادیر زیاد ضریب و درجه توسعه کارستی ۳/۷ و آبخوان سرابگرم دارای دو زیررژیم با مقادیر کم ضریب و درجه توسعه کارستی ۲/۷ است. بررسی مقادیر درجه توسعه کارستی، مقادیر ضریب و همچنین تعداد و نوع زیررژیم‌ها حکایت از توسعه ناهمگون آبخوان‌های کارستی در حوضه الوند دارد. ضریب تغییرات دبی چشمه‌های محدوده این پژوهش نشان‌دهنده توسعه یافته‌تر بودن آبخوان‌های ماراب و ریجاب است. رخنمون سازندهای کربناته و تکتونیزه بودن منطقه، عامل اصلی شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست و توسعه فرایند کارست‌زایی در ارتفاعات حوضه رودخانه الوند است. اما عوامل ثانویه همچون ارتفاع، اقلیم و توپوگرافی، سطح توسعه‌یافتگی سامانه‌های کارستی حوضه الوند را تحت تأثیر قرار داده است. عدم توسعه‌یافتگی یکسان ژئومورفولوژی کارست سطحی بر اثر عواملی که بیان شد، موجب شد که با وجود تشابه لیتولوژیکی و زمین‌ساختی در حوضه تغذیه‌کننده آبخوان‌ها رفتار هیدرودینامیکی آنها متفاوت باشد. بررسی تأثیر لیتولوژی بر درجه توسعه کارستی و رفتار هیدرودینامیکی چشمه‌ها نتیجه مشخصی به‌دست نمی‌دهد؛ زیرا آبخوان‌های ماراب و ریجاب به‌مثابه توسعه‌یافته‌ترین آبخوان‌ها و آبخوان سرابگرم به‌مثابه آبخوانی با کمترین میزان توسعه‌یافتگی، از سازند آسماری^۵ شهبازان تغذیه می‌کند. حوضه تغذیه‌کننده آبخوان سرابگرم در تقادیس دنوشک واقع شده که بیشینه ارتفاع آن ۱۲۰۰ متر است و این امر به کاهش بارش، افزایش دما و در نتیجه کند شدن فرایند کارست‌زایی منجر شده است. اما حوضه‌های تغذیه‌کننده چشمه‌های ریجاب و ماراب در کوهستان‌های مرتفع دالاهو و نواکوه واقع شده و این امر سبب مساعد شدن شرایط اقلیمی برای توسعه فرایند کارست‌زایی شده است. ژئومورفولوژی کارست سطحی عامل اصلی مقدار و چگونگی تغذیه آبخوان‌هاست؛ بنابراین هرچه تغذیه بیشتر باشد، میزان توسعه کارست شبکه درونی آبخوان به‌علت انحلال بیشتر آب ورودی در طول زمان بیشتر می‌شود. مطابقت ژئومورفولوژی سطحی کارست با درجه توسعه کارستی آبخوان‌ها در زمان حال نیز این امر را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که آبخوان‌های ریجاب و ماراب دارای

ژئومورفولوژی سطحی توسعه‌یافته‌تری است و درجه توسعه کارست آنها نیز بیشتر است. از سوی دیگر، فیزیوگرافی حوضه‌های تغذیه‌کننده آبخوان‌ها نیز تأثیر بسزایی بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌ها و تعداد و نوع زیررژیم‌ها دارد. از نظر شکل حوضه، آبخوان‌های ماراب و ریجاب کشیدگی کمتری نسبت به آبخوان‌های سراب‌گرم و گلین دارد؛ کشیدگی کمتر حوضه تغذیه‌کننده موجب کاهش زمان تمرکز، تخلیه آب نفوذی در آبخوان به صورت پالس فشاری با دبی زیاد از آن و شکل‌گیری زیررژیم‌های آشفته می‌شود. به‌علت طولانی بودن زمان تمرکز در آبخوان‌های کشیده، آب نفوذی در مدت‌زمان طولانی و با دبی یکنواخت‌تری تخلیه می‌شود و زیررژیم‌های خطی را شکل می‌دهد. از دیگر عوامل تأثیرگذار بر رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های حوضه لوند، ارتفاع است که با تغییر داده‌های حرارتی و رطوبتی سبب افزایش بارش و کاهش تبخیر در ارتفاعات بالاتر می‌شود و این امر سبب تغذیه بیشتر آبخوان‌ها و افزایش حجم آب ورودی به آنها می‌شود که خود بر زیررژیم آبخوان‌ها مؤثر است. از سوی دیگر، کاهش دما و افزایش بارش، شرایط مساعدی را برای توسعه کارست سطحی و درونی فراهم می‌کند. درنهایت، می‌توان گفت که به‌ترتیب سه عامل ژئومورفولوژی کارست سطحی، فیزیوگرافی حوضه‌های تغذیه‌کننده و ارتفاع (افزایش بارش و کاهش دما) مهم‌ترین تأثیر را بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی و درجه توسعه کارست آبخوان‌های حوضه لوند دارد.

منابع

- قمی اوپلی، ج. (۱۳۷۶). «مطالعه لیتواستراتیگرافی و بررسی کارستی شدن رخنمون‌های کربناته منطقه نوا- قلاجه در غرب استان کرمانشاه». پایان‌نامه کارشناسی ارشد. تهران: دانشگاه تهران.
- Boussinesq, M.J. (1877). "Essai sur la theories des eaux courantes". Memoires presentes par divers savants a l'Academie des Sciences de l'Institut National de France. Tome XXIII.
- Civita, M.V. (2008). "An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data". *Hydrogeology Journal*. 16 (5). Pp. 855-869.
- Cooper, H. and Rorabaugh, M.I. (1963). "Groundwater movements and bank storage due to flood stages in surface streams". *USGS Water Supply Pap* (1536-J). Pp. 343-366.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Bakalowicz, M., Weng, P., and Al-Malki, A. (2003). "Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer". *Journal of Hydrology*, 274(1). Pp. 248-269.
- Drogue, C. (1967). "Essai de determination des composantes de l'écoulement des sources karstiques". Evaluation de la capacité de rétention par chenaux et fissures. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. *Chronique d'Hydrogéologie* (10). Paris.
- Forkasiewicz, J. and Paloc, H. (1967). "Le régime de tarissement de la Foux de la Vis". *Chronique d'hydrogéologie* 10. Pp. 59-73.
- Griffiths, G.A. and Clausen, B. (1997). "Streamflow recession in basins with multiple water storages". *J Hydrol.* 190. Pp. 60-74.
- Horton, R.E. (1933). "The role of infiltration in the hydrological cycle". *Trans Am Geophys Union*. 14. Pp. 446-460.
- Karimi, H. (2003). "Hydrogeological behavior of Alvand karst aquifers, Kermanshah". PhD Thesis. Shiraz: University of Shiraz. (in English).
- Karimi, H., Raeisi, E. and Bakalowicz, M. (2005). "Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin, northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach". *Hydrogeology Journal*. 13 (5-6). Pp. 787-799.
- Kovács, A. (2003). "Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers - a hydrodynamic modelling approach". PhD. Thesis. La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel, 131 p.

- Kresic, N. and Bonacci, (2010). "Spring discharge hydrograph. In Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability". Elsevier ch 4. Pp. 129-163.
- Kuhta, M., Brki, and Stroj, A. (2012). "Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia". *Geologia Croatica*. 65 (1). Pp. 41-52.
- Kullman, E. (1980). "L'evaluation du regime des eaux souterraines dans les roches carbonatiques du Me´sozoique des Carpates Occidentales par les courbes de tarissement des sources". *Geologicky Sbornik Dnyho Slovenska, Bratislava. Zapravne Karpaty. sehydrogeologia a inžinierska geologia* 3. Pp. 7-6.
- Lastennet, R. and Mudry, J. (1997). "Role of karstification and rainfall in the behavior of a heterogeneous karst system". *Environmental Geology*. 32 (2). Pp. 114-123.
- Lørup, J.K., Refsgaard, J.C. and Mazvimavi, D. (1998). "Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: case studies from Zimbabwe". *Journal of Hydrology*. 205 (3). Pp. 147-163.
- Maillet, E. (1905). *Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale*. Paris: Hermann.
- Malík, P. and Vojtková, S. (2012). "Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs". *Environmental Earth Sciences*. 65 (8). Pp. 2245-2257.
- Moore, G.K. (1992) "Hydrograph analysis in a fractured rock terrane". *Groundwater*. 30 (3). Pp. 390-395.
- Padilla, A., Pulido Bosch, A. and Mangin, A. (1994). "Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring". *Ground Water* 32. Pp. 267-277.
- Troch, P.A., De Troch, F.P. and Brutsaert, W. (1993). "Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions". *Water resources research*. 29 (2). Pp. 427-434.