

بررسی پتانسیل منابع آبی کارست پرآو-بیستون به عنوان منابع تأمین آب پایدار اکوسیستم‌های زاگرس

ساسان زنگنه تبار^۱، مهرنوش قدیمی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲. استادیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۸/۱۳)

چکیده

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع طبیعی مهم جهانی برای جوامع و نیز فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی هستند. یکی از منابع مهم کارست، منابع آبی آن است. شناخت عوامل مؤثر در تغذیه چشمه‌ها و همچنین تعیین مناطق با پتانسیل بالای منابع آب کارستی، می‌تواند به ما برای مدیریت منابع آب کمک کند. هدف از تحقیق حاضر، تعیین پتانسیل منابع آب توده کارستی پرآو-بیستون است. برای شناخت منشأ کارستی چشمه‌های منطقه مطالعه شده از آنالیز هیدروشیمیایی آب آنها استفاده شد. تیپ آب کربناته، رخساره کلسیک، قرارگرفتن در ناحیه چپ نمودار پایپر و بررسی نسبت مولار، همگی، نشان‌دهنده منشأ کارستی چشمه‌های منطقه مطالعه شده است. در پژوهش حاضر با استفاده از مدل TOPSIS و بررسی هشت متغیر سنگ‌شناسی، تراکم گسل، بارش، تراکم آبراهه، شیب، ارتفاع، جهت شیب و پوشش گیاهی، به تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی در توده کارستی پرآو-بیستون اقدام شد. به این منظور، برای استانداردسازی لایه‌ها از منطق فازی و برای تعیین وزن هر یک از لایه‌ها از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد. در نهایت با اجرای مدل، نقشه پتانسیل منابع آب کارست منطقه مطالعه شده به دست آمد. بررسی نقشه نهایی، بیان‌کننده تأثیر زیاد دو عامل سنگ‌شناسی و گسل‌ها در پتانسیل منابع آب کارست هستند، به طوری که طبقات با پتانسیل بالا، منطبق بر سازندهای ضخیم لایه آهکی با تراکم زیاد گسل‌ها و شکستگی‌های محلی‌اند. از نظر سنگ‌شناسی، طبقه با پتانسیل خیلی زیاد منطبق بر واحد آهک بیستون با خالص‌ترین نوع آهک و بخش‌هایی از رادیولاریت‌هاست. در کل، چشمه‌های پرآبی مانند سرابله، بیستون، برناج، شاه حسین و ورمنج در طبقات با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده برآورد مناسب مدل از مناطق با پتانسیل بالای منابع آب کارست است.

کلیدواژگان: پرآو-بیستون کارست، منابع آب، هیدروشیمیایی، TOPSIS.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع طبیعی مهم جهانی برای جوامع و نیز فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی‌اند [۱-۴]. با توجه به افزایش جمعیت و به دنبال آن، نیاز روزافزون به این منبع، بر ضرورت و اهمیت وجود آب به‌عنوان منبعی حیات‌بخش افزوده می‌شود. یکی از منابع مهم کارست، منابع آبی آن است. تقریباً، یک پنجم از سطح کره زمین توسط سازندهای مختلف کربناته پوشیده شده است [۵]. از طرف دیگر، بیش از ۲۵ درصد جمعیت جهان یا مستقیم روی مناطق کارستی زندگی می‌کنند و یا آب مورد نیاز خود را از منابع کارستی به دست می‌آورند [۶]. امروزه، در دنیا کارست را یک منبع ارزشمند به شمار می‌آورند و اعتقاد عمومی بر این است که هر نوع دخل و تصرف به منظور بهره‌برداری از منابع آن باید با مطالعه و برنامه‌ریزی دقیق همراه باشد. در واقع، کارست منبعی منحصربه‌فرد و تجدیدنپذیر با ارزش‌های مهم بیولوژیکی، هیدرولوژیکی، معدنی، علمی، فرهنگی، تفریحی و اقتصادی است [۷]. عوامل مؤثر بر پتانسیل آب کارست، نشان‌دهنده معرفی عواملی هستند که احتمال وجود آب را در یک منطقه کارستی نسبت به دیگر مناطق افزایش می‌دهند. برای معرفی زون‌های پتانسیل آب کارست، روش‌های مختلفی همچون زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، ژئوفیزیک و روش‌های سنجش از دور وجود دارد. استفاده از سنجش از راه دور و GIS برای تعریف مناطق پتانسیل آب زیرزمینی (GWPZs) شامل ادغام عوامل مختلف مانند سنگ‌شناسی، خاک، بارش، بافت خاک [۸]، سیستم زهکشی [۹ و ۱۰]، شیب، ارتفاع [۱۱-۱۳]، خصوصیات و تراکم گسل [۱۴]، است که همه بر وقوع آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند. بررسی منابع آب کارست و نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعات می‌تواند برای مدیریت کمی، کیفی و حفاظت از این منابع در مقابل آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی استفاده شود.

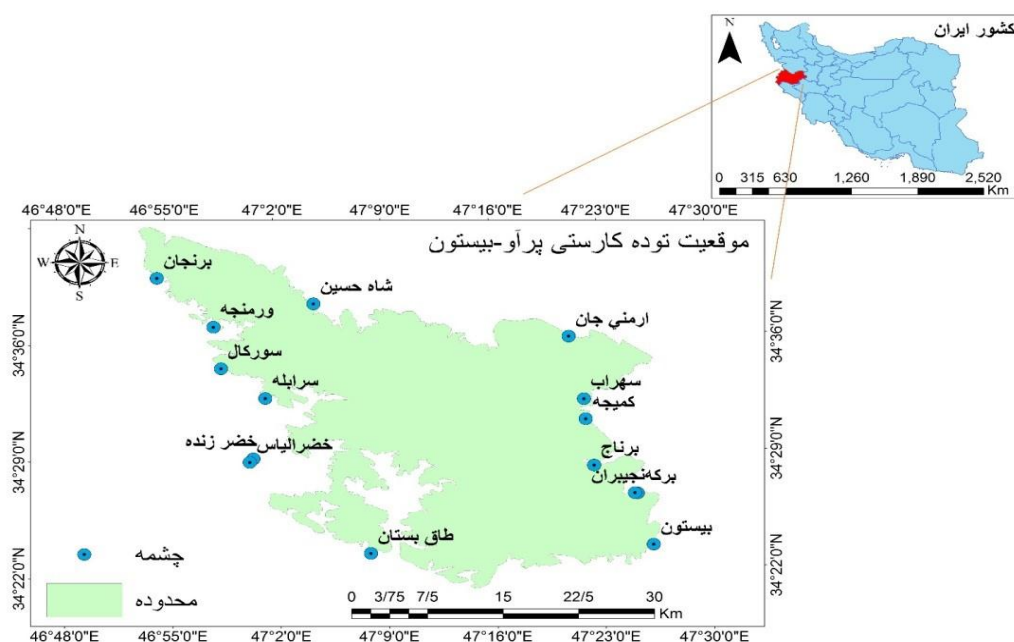
در زمینه بررسی عوامل مؤثر در پتانسیل منابع آب کارست، مطالعاتی در سطح جهان و ایران صورت گرفته است:

ایتیشری^۱ و همکارانش [۱۵] در تحقیقی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای، آب زیرزمینی در منطقه یونائو در

کشور هند را پتانسیل‌یابی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد حدود ۱۵ درصد از مساحت منطقه پتانسیل خوب و خیلی خوب از نظر آب زیرزمینی را دارد. ارزیابی نقشه به‌دست‌آمده از فرایند تحلیل شبکه‌ای با چاه‌های موجود در منطقه نشان داد این مدل دقت قابل قبولی داشته است. کمار^۲ و همکارانش [۱۶] در مطالعه‌ای محدوده‌های بالقوه دارای آب زیرزمینی در حوضه رودخانه khoh را با استفاده از سنجش از دور، GIS و الگوی منطق فازی تعیین کردند. در پژوهش یادشده از داده‌های زمین‌شناسی، زهکشی، خطواره‌ها، شیب، کاربری اراضی و ژئومورفولوژی استفاده شده است. نتایج پژوهش آنها نشان داد ۴۰ درصد از منطقه ظرفیت عالی منابع آب زیرزمینی دارد. وایکار و نیلاوار^۳ [۱۷] در مقاله‌ای با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک GIS، مناطق بالقوه آب زیرزمینی در منطقه Chartana در هند را بررسی کرده‌اند. نتایج مطالعه آنها نشان داد محدوده با پتانسیل عالی، منطبق بر مناطق پست مرکزی و محدوده با پتانسیل ضعیف، منطبق بر ارتفاعات حاشیه منطقه‌اند. رحمتی و همکارانش [۴]، در مقاله‌ای با استفاده از مدل‌های حداکثر آنتروپی و جنگل تصادفی به تهیه نقشه پتانسیل منابع آب منطقه مهران در ایران اقدام کردند. در تحقیق یادشده، از اطلاعات ۱۱۴ چاه (۷۰ درصد برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی) استفاده شد. در نهایت، نقشه نهایی با داده‌های موجود آب زیرزمینی و منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC)، اعتبارسنجی شد و نتایج نشان می‌دهد دو مدل استفاده‌شده به عنوان مدل‌های مؤثر برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی شناخته شده‌اند. دشتی و همکارانش [۱۸] در پژوهشی پتانسیل منابع آب کارست کوه‌های دوان و شاپور با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد پتانسیل آب کارست دشتک شمالی بیش از جنوبی است. هماهنگی نواحی با پتانسیل بالا با چشمه‌های با آبدی زیاد نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای منطقه‌های کارستی استفاده شود. رضوی ترمه و همکارانش [۱۹] در مقاله‌ای با استفاده از نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی به تهیه نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در محدوده شهرستان چهارم اقدام کردند. در تحقیق یادشده، دوازده معیار

زیادی دارد. منابع آبی کارست‌های زاگرس علاوه بر تأمین آب شرب و کشاورزی ساکنان زاگرس، کارکرد بسیار مهمی در تغذیه رودخانه‌های زاگرس و به تبع آن، سدهای احداث شده روی آنها دارند. به طوری که حدود ۸۰ درصد از منابع آب غرب کشور از منابع آب کارست تأمین می‌شود [۲۱]. آب موجود در آبخوان‌های توده کارستی پرآو-بیستون توسط چشمه‌های متعددی که در حاشیه آن قرار دارند، تخلیه می‌شوند. شناخت عوامل مؤثر در تغذیه چشمه‌ها و همچنین تعیین مناطق با پتانسیل بالای منابع آب کارستی، می‌تواند به ما در مدیریت منابع آب کمک کند. منطقه مطالعه شده (توده کوهستانی پرآو-بیستون) از نظر تقسیم‌های سیاسی بین شهرستان‌های کرمانشاه، صحنه و هرسین قرار دارد. این توده با روند شمال غربی- جنوب شرقی جزئی از زون زاگرس مرتفع است و بخشی از آن در زون دگرگون شده سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد. مساحت آن ۹۳۰/۵ کیلومتر مربع و محیط آن ۴۴۹ کیلومتر است. موقعیت جغرافیایی آن از ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی و از ۴۶ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی است. کوه پرآو با ۳۳۸۵ متر از سطح دریا بلندترین نقطه و کمترین ارتفاع منطقه مطالعه شده ۱۲۸۴ متر است. شکل ۱، موقعیت منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد.

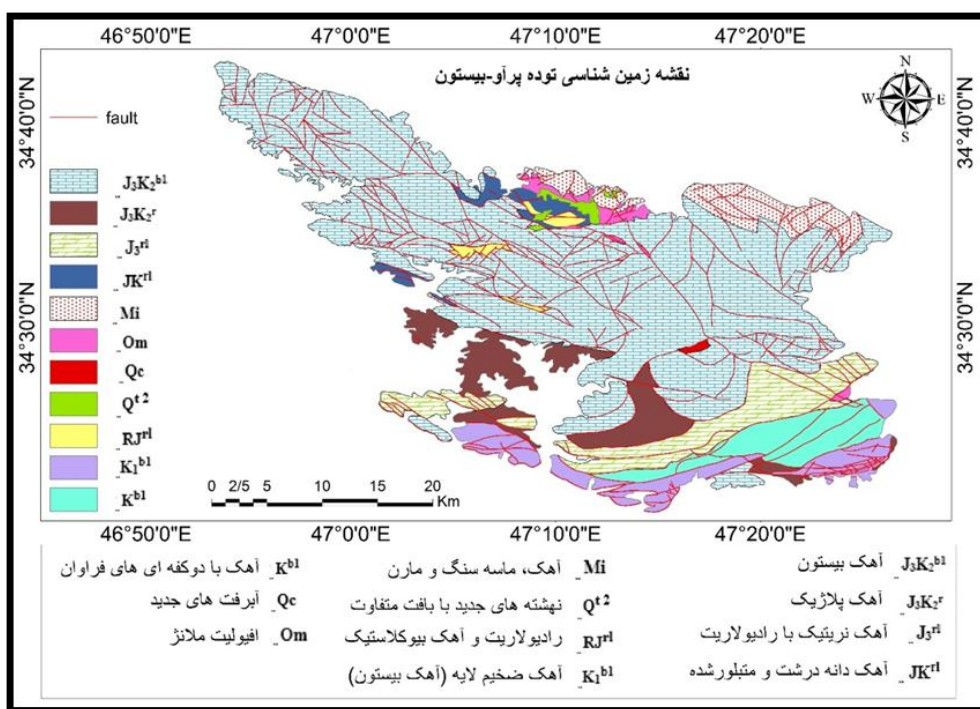
هیدرولوژی، زمین‌شناسی و جغرافیای طبیعی که بر موقعیت چشمه‌ها اثر می‌گذارد، در نظر گرفته شد و در محیط ArcGIS این داده‌ها پردازش و آماده شد. پس از تهیه نقشه نهایی، ارزیابی نتایج با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC)، نشان‌دهنده دقت بسیار زیاد برای این سه مدل و برتری مدل آنتروپی نسبت به دو مدل دیگر است. همچنین، براساس مدل آنتروپی لایه‌های شاخص توان آبراهه، ارتفاع، شیب و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعه شده داشته‌اند. ملکی و همکارانش [۲۰] در مقاله‌ای قابلیت منابع آب زیرزمینی در سازند کارستی کوه خورین کرمانشاه را با استفاده از الگوی Fuzzy Logic/AHP و به کارگیری هشت معیار تحول شکل‌های کارست، لیتولوژی، فاصله از محل برخورد گسل‌ها، فاصله از گسل‌ها، شیب توپوگرافی، تراکم طول گسل‌ها، فاصله از محل چشمه‌ها و جهت شیب ساختمانی لایه‌ها بررسی کرده‌اند. سپس، برای حصول اطمینان از نقشه پهنه‌های پتانسیل منابع آب کارست منطقه، این پهنه‌ها را با عملیات میدانی و روش‌های ژئوفیزیکی ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد دامنه جنوبی کوه خورین و اطراف تالاب هسیلان نسبت به دامنه شمالی آن، قابلیت نفوذ و پتانسیل منابع آب کارستی بیشتری دارد. جنبه هیدرولوژیکی کارست‌های زاگرس اهمیت بسیار



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده (توده کارستی پرآو-بیستون)

رس دار آهک‌های بیوکلاستیک است. جهت غالب گسل‌های منطقه مطالعه شده به تبعیت از گسل‌های اصلی زاگرس شمال غربی - جنوب شرقی است. معمولاً، مجاری کارستی از مسیر گسل‌ها، درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی تبعیت می‌کنند. افق‌هایی که دو یا چند گسل دارند و یا همدیگر را قطع می‌کنند، مستعدترین نقاط برای فرایند کارستی‌شدن هستند [۲۳]. گسل‌ها به دلیل تأثیر بر مقدار نفوذ و تغذیه منابع آب زیرزمینی از پارامترهای مهم زمین‌شناسی‌اند. از لحاظ زمین‌شناسی وجود تراکم زیاد گسل‌ها در لایه‌های آهکی شرایط مناسبی را برای ذخیره و حرکت آب فراهم می‌کند. هر چه مقدار گسل و شکستگی در منطقه بیشتر باشد، تغذیه آبخوان‌ها در آن منطقه بیشتر است. شکل ۲ نقشه سنگ‌شناسی و موقعیت گسل‌ها را نشان می‌دهد.

بررسی وضعیت زمین‌شناسی توده کارستی پرآو-بیستون منطقه مطالعه شده، جزئی از زون زاگرس مرتفع است. سنگ‌های آهکی بیستون و رادیولاریت‌های کرمانشاه واحدهای اصلی منطقه را تشکیل می‌دهند. کهن‌ترین بخش آهک‌های بیستون، شامل آهک‌های ستبر لایه در زیر و آهک‌های توده‌ای ریفی در بالا به ضخامت حدود ۳۰۰ متر است که دیرینه تریاس بالا دارد [۲۲]. واحدهای ژوراسیک بالایی بیستون، آهک‌های ضخیم لایه‌ای هستند که صخره‌های کوه بیستون را تشکیل می‌دهند. واحد آهکی بیستون با حدود ۷۴ درصد از مساحت منطقه، مهم‌ترین واحد آهکی در توده پرآو-بیستون است. رادیولاریت‌ها با مساحتی حدود ۲۰ درصد، دیگر واحد سنگ‌شناسی منطقه هستند و شامل رادیولاریت‌هایی با نسبتی از گل سنگ، آهک سیلیس‌دار، طبقاتی از چرت رادیولاریتی و سنگ



شکل ۲. نقشه سنگ‌شناسی توده کارستی پرآو-بیستون

گسل‌ها، لایه کاربری اراضی استان کرمانشاه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، لایه ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۵۰ متر برای تهیه لایه ارتفاع، شیب و جهت شیب و آمار بارش برای تهیه لایه بارش منطقه است. نخست با استفاده از نقشه توپوگرافی، محدوده منطقه مطالعه شده مشخص شد. در پژوهش حاضر از هشت متغیر سنگ‌شناسی، تراکم

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر توسعه‌ای-کاربردی است و بر روش‌های میدانی، ایزاری و کتابخانه‌ای اتکا دارد. داده‌های اصلی پژوهش، نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی کرمانشاه، کامیاران و میان‌راهان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای تهیه لایه‌های سنگ‌شناسی و

که داده‌ها به عنوان معیارهای بررسی شده برای هر پیکسل از نقشه‌ها در نظر گرفته شد. در ادامه، معیارهای کیفی پس از کمی‌سازی همراه با سایر معیارها ارزش‌گذاری شده و با استفاده از تابع فازی در نرم‌افزار ArcGIS استانداردسازی شدند. همچنین، با استفاده از روش مقایسه زوجی در نرم‌افزار expert choice وزن مربوط به هر یک از معیارها به دست آمد. در پایان، با انجام مراحل TOPSIS مطابق مراحل شکل ۳ و فرمول‌های رابطه ۱، نقشه نهایی طبقات مختلف پتانسیل منابع آب کارست منطقه مطالعه شده تهیه شد.

گسل، بارش، تراکم آبراهه، شیب، ارتفاع، جهت شیب و پوشش گیاهی به منظور تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای کارستی منطقه مطالعه شده استفاده شد.

طی عملیات میدانی لندفرم‌های کارستی منطقه شناسایی شد (شکل ۹). به منظور بررسی هیدروشمیایی چشمه‌های منطقه مطالعه شده از اطلاعات چشمه‌ها برگرفته از آب منطقه‌ای استان کرمانشاه و برای تهیه نمودار پایپر آنها از نرم‌افزار RockWare Aq.Qa استفاده شد. برای اجرای مدل TOPSIS ابتدا ماتریس داده‌ها تشکیل شد، به طوری



شکل ۳. نمودار چارچوب کار در استفاده عملیاتی از مدل TOPSIS

است. افزایش غلظت Mg یا کاهش نسبت مولار Ca/Mg نشان‌دهنده زمان ماندگاری بیشتر آب در آبخوان و معرف جنس سازند تغذیه‌کننده چشمه است [۲۳]. مقدار این نسبت در چشمه‌های مطالعه‌شده بیشتر از ۲ و برای بعضی از چشمه‌ها بیش از ۸ است که زمان ماندگاری کم آب در آبخوان را نشان می‌دهد و منعکس‌کننده سنگ آهک در منطقه تغذیه چشمه‌هاست. بررسی اطلاعات چشمه‌های منطقه مطالعه‌شده طبق جدول ۱، نشان می‌دهد از دید آنیونی، یون بی‌کربنات (HCO₃) در چشمه‌ها غالب و تیپ آب آنها کربناته است. از نظر کاتیونی، کاتیون غالب کلسیم و بعد از آن منیزیم است و آب چشمه‌ها، رخساره کلسیک دارد. ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها تأییدکننده منشأ کارستی آنهاست. چشمه‌های مطالعه‌شده در ناحیه چپ نمودار پایپر (شکل ۴) قرار می‌گیرند که تیپ بی‌کربناته و زیادبودن قلیایی‌های دوظرفیتی کلسیم - منیزیم در آب چشمه‌ها را نشان می‌دهد. این اتفاق منشأ کارستی چشمه‌های مطالعه‌شده و تأمین آب آنها از ارتفاعات کربناته منطقه مطالعه‌شده را تأیید می‌کند. همچنین، بررسی نسبت مولار بیان‌کننده زمان ماندگاری کم آب در آبخوان و منعکس‌کننده سنگ آهک در منطقه تغذیه چشمه‌هاست.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_{+j})^2}$$

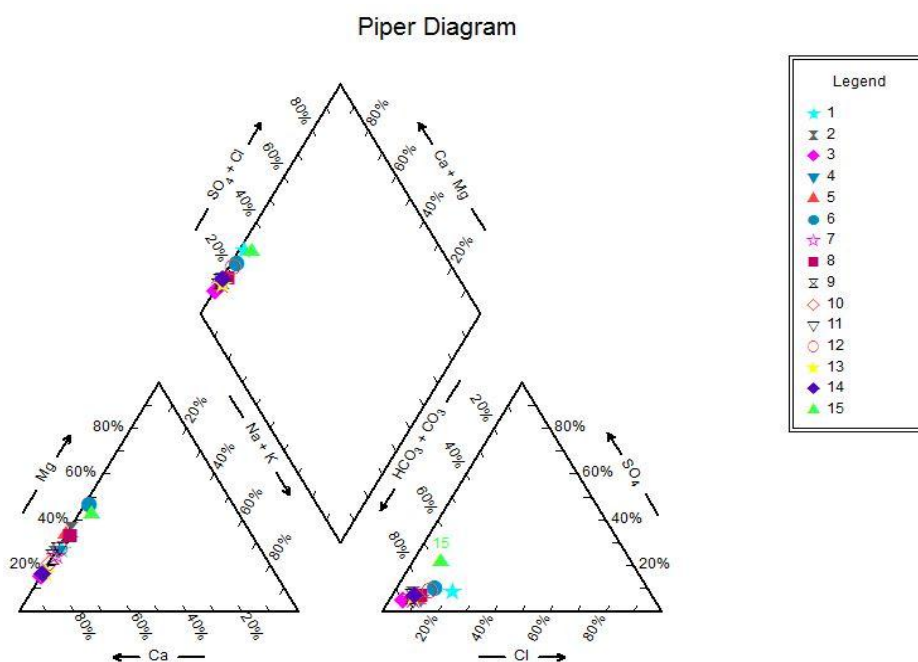
$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_{-j})^2}$$

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}$$
(۱)

یافته‌ها

بررسی وضعیت هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه‌های منطقه مطالعه‌شده

علاوه بر سازند نفوذپذیر در منطقه مطالعه‌شده، دولین‌ها و سایر چاله‌های کارستی کارکرد مهمی در انتقال آب‌های سطحی به لایه‌های زیرین و تغذیه منابع آب زیرزمینی دارند. این آب‌ها در نهایت به وسیله چشمه‌های متعدد کارستی در اطراف منطقه مطالعه‌شده خارج شده و مورد مصرف شرب و کشاورزی ساکنان بومی قرار می‌گیرند. بیشترین دبی چشمه‌های مطالعه‌شده در اواخر زمستان و اوایل بهار و کمترین دبی آنها در شهریورماه مشاهده می‌شود. معمولاً، مقدار هدایت الکتریکی (EC) چشمه‌های کارستی کمتر از (۵۰۰ μs/cm) به دست می‌آید. میزان EC چشمه‌های مطالعه‌شده (غیر از چشمه طاق‌بستان) کمتر از ۵۰۰ بوده و برای بیشتر آنها بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ μs/cm



شکل ۴. نمودار پایپر چشمه‌های توده کارستی پرآو-بیستون

جدول ۱. اطلاعات چشمه‌های توده کارستی پرآو-بیستون برگرفته از آب منطقه‌ای استان کرمانشاه

نام چشمه	code	EC	TDS	PH	Q	HCO3	So4	Cl	Na	K	Ca	Ma	ca
		µs/cm	ppm		l/s	mEq/l	mEq/l	mEq/l	mEq/l	mEq/l	mEq/l	mEq/l	mg
طلاق بستان	۱	۵۶۹	۳۶۴	۷/۳۴	۱۹۸۷	۴/۵	۰/۳۷	۰/۷	۰/۰۹	۰/۱	۴/۵	۱	۴/۵
شاه حسین	۲	۳۳۲	۲۱۲	۷/۸۸	۸۶۷	۲/۹	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۰۶	.	۲/۴	۰/۸	۳
خضر زنده	۳	۳۲۴	۲۰۷	۷/۸۳	۲۲	۲/۹	۰/۱۱	۰/۱	۰/۰۳	.	۲/۸	۰/۳	۹/۳
سرایله	۴	۲۹۱	۱۸۳	۸/۰۴	۱۰۱۱	۲/۵	۰/۱۱	۰/۲	۰/۰۳	.	۲/۳	۰/۵	۴/۶
ورمنجه	۵	۳۱۱	۱۹۹	۸/۰۳	۴۹۲	۲/۷	۰/۱۱	۰/۲	۰/۰۳	.	۲/۳	۰/۷	۳/۲۸
خضر الیاس	۶	۲۹۸	۱۸۸	۷/۷۷	.	۳/۱۷	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۱۲	.	۲/۴	۱/۱	۱/۸۵
برنجان	۷	۳۸۴	۲۴۶	۷/۷۵	۵۴	۳/۴	۰/۱۴	۰/۲	۰/۰۶	۰/۰۲	۳/۱	۰/۶	۵/۱۶
سورکال	۸	۳۲۱	۲۰۵	۷/۸۶	۵	۲/۷	۰/۱۷	۰/۲	۰/۰۹	.	۲/۳	۰/۷	۳/۲۸
برناج	۹	۳۳۶	۲۱۵	۷/۷۸	۸۹۸	۲/۹	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۳	.	۲/۷	۰/۵	۵/۴
برکه	۱۰	۳۰۷	۱۹۶	۷/۹۴	۸۸	۲/۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۳	.	۲/۵	۰/۴	۶/۲۵
کمیجه	۱۱	۳۸۴	۲۴۶	۷/۹	۳۳	۳/۴	۰/۱۴	۰/۲	۰/۰۶	.	۳	۰/۷	۴/۲۸
سهراب	۱۲	۴۰۱	۲۵۷	۷/۶۵	۳۴	۳/۳	۰/۳۷	۰/۳	۰/۰۹	.	۳/۱	۰/۷	۴/۴۲
ارمنی جان	۱۳	۳۹۵	۲۵۳	۷/۹۴	۶	۳/۵	۰/۱۷	۰/۲	۰/۰۹	.	۳/۴	۰/۴	۸/۵
نجیران	۱۴	۳۰۷	۱۹۶	۷/۹۵	۲۱۶	۲/۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۰۳	.	۲/۶	۰/۳	۸/۷
بیستون	۱۵	۴۷۷	۳۰۵	۷/۶۳	۴۸۱	۳/۵	۰/۸	۰/۳	۰/۳۲	.	۲/۹	۱/۴	۲/۰۷

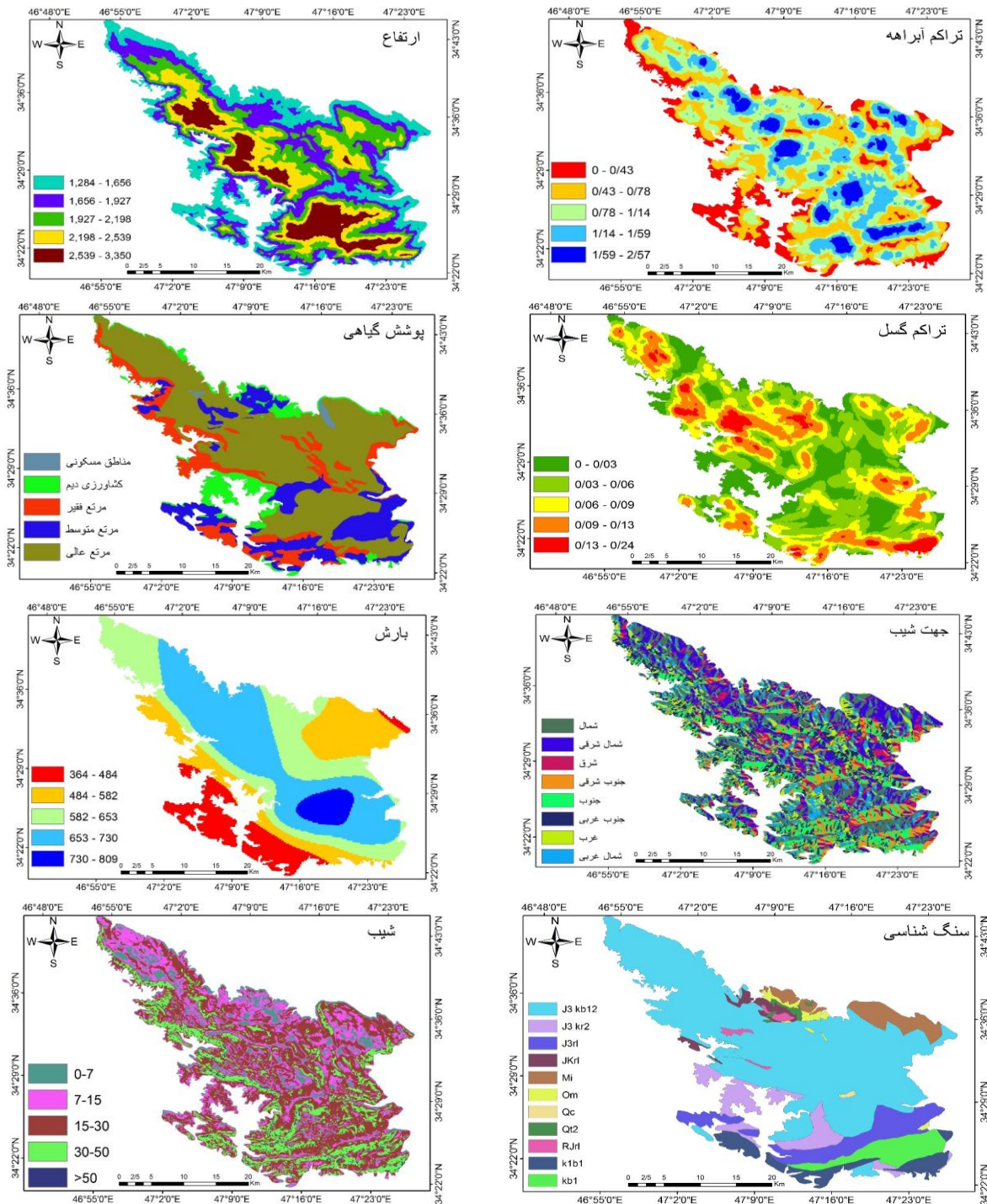
و تغذیه منابع آب زیرزمینی از پارامترهای مهم زمین‌شناسی هستند. از لحاظ زمین‌شناسی وجود تراکم زیاد گسل‌ها در لایه‌های آهکی شرایط مناسبی را برای ذخیره و حرکت آب فراهم می‌کنند. هر چه مقدار گسل و شکستگی در منطقه بیشتر باشد، تغذیه آبخوان‌ها در آن منطقه بیشتر است. سازندهای کربناته توانایی زیادی در نفوذ و انتقال منابع آب زیرزمینی دارند. لیتولوژی سنگ‌های کربناته، بر میزان تخلخل، نفوذپذیری و قابلیت کارستی شدن آنها تأثیر دارد. توسعه شدید کارست اغلب در آهک‌های توده‌ای یا ضخیم‌لایه مشاهده می‌شود [۲۳]. جهات شیب شمالی یا به اصطلاح پشت به آفتاب، کمتر در معرض نور آفتاب قرار می‌گیرند و در بیشتر اوقات روز با توجه به موقعیت توپوگرافی مناطق کوهستانی سایه دارند. بنابراین، این مکان‌ها تخریب کمتری دارند و برف باریده‌شده روی آنها دیرتر به رواناب، تبدیل می‌شود و زمان بیشتری برای نفوذ و انتقال به منابع آب زیرزمینی در اختیار دارد. گیاهان بر میزان تغذیه مناطق کارستی مؤثرند. پوشش گیاهی در هر منطقه سرعت جریان‌های سطحی را کاهش می‌دهد و سبب نفوذ بیشتر آب به داخل خاک می‌شود. در مناطق کارستیک، توسعه و تکامل آبراهه‌ها به دلیل فرایندهای کارستی است، بنابراین چشمه‌ها در بیشتر مواقع به عنوان تأمین‌کننده جریان آب در آبراهه‌ها هستند. این مسئله سبب شده که فراوانی چشمه‌ها به حضور آبراهه‌ها مرتبط باشد که با نتایج درواری و همکارانش [۲۴] مطابقت دارد.

این نقشه‌ها با استفاده از تابع linear منطق فازی، در

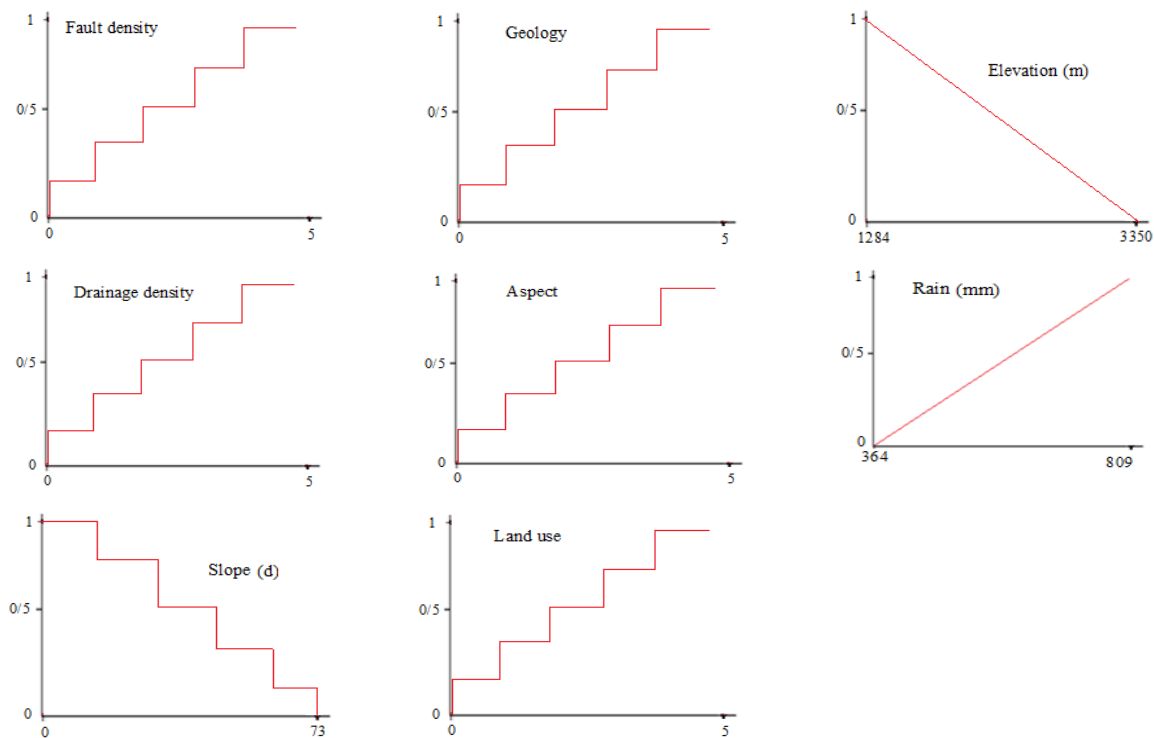
متغیرهای بارش، ارتفاع، شیب، تراکم گسل، سنگ‌شناسی، جهت شیب، پوشش گیاهی و تراکم آبراهه به‌منظور تعیین پتانسیل منابع آب کارست منطقه مطالعه‌شده، بررسی شده و نقشه مربوط به هر یک از آنها تهیه شد (شکل ۵). متغیرهای انتخاب‌شده هر یک به گونه‌ای در نفوذ و تغذیه آبخوان‌های کارستی نقش دارند. تهیه نقشه هر یک از عوامل و ترکیب آنها با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند TOPSIS می‌تواند به ما در ایجاد نقشه نهایی پتانسیل منابع آب کمک کند. دلیل انتخاب پارامتر بارندگی، تأثیرگذاری آن در حجم آب نفوذی به داخل زمین است. به طور مشخص، مناطقی که مقدار بارندگی بیشتری داشته باشند، آب دریافتی بیشتری برای نفوذ در اختیار خواهند داشت. در مناطق مرتفع‌تر، آب دریافتی از طریق بارش‌ها نیز بیشتر است، اما در عوض آبدهی چشمه‌ها و فراوانی وقوع آنها با افزایش ارتفاع رابطه عکس دارد. زیرا در طبقات بالای ارتفاعی به دلیل تغذیه محدودتر و کم‌شدن سطح نفوذ آب، اصولاً یا چشمه‌ای رخ نمی‌دهد و یا دارای آبدهی کمتری هستند. در مناطق دارای شیب زیاد، امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد و همچنین رویش گیاه فراهم نیست. بنابراین، آب باران به سرعت جاری می‌شود و فرصت نفوذ نخواهد داشت. هرچه شیب بیشتر باشد، میزان توسعه فروچاله‌های کارستی به عنوان مجراهای اصلی تغذیه‌کننده منابع آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. به طور کلی، در دامنه‌های با شیب زیاد تغذیه منابع آب زیرزمینی با کاهش چشمگیری مواجه می‌شود. گسل‌ها به دلیل تأثیر بر مقدار نفوذ

کمی‌سازی شده و با استفاده از رابطه خطی افزایشده، فازی‌سازی شدند. شکل ۶، نمودار فازی هر یک از نقشه‌های استفاده‌شده را نشان می‌دهد. برای وزن‌دهی نقشه‌ها با توجه به نظر کارشناسی، از روش مقایسه زوجی در نرم‌افزار expert choice استفاده شد که شکل ۷، وزن‌های به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

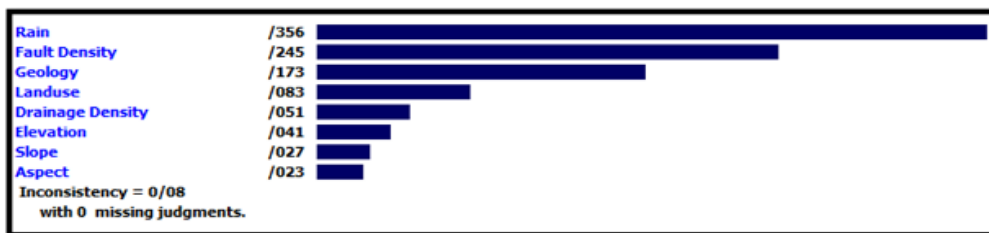
دامنه صفر تا یک استانداردسازی شدند. در این مرحله، لایه‌های بارش، تراکم آبراهه و تراکم گسل با استفاده از رابطه خطی افزایشده و لایه‌های شیب و ارتفاع با استفاده از رابطه خطی کاهشده، فازی‌سازی شدند. همچنین لایه‌های کیفی سنگ‌شناسی، جهت شیب و پوشش گیاهی با توجه به تأثیری که در توسعه کارست منطقه مطالعه‌شده دارند



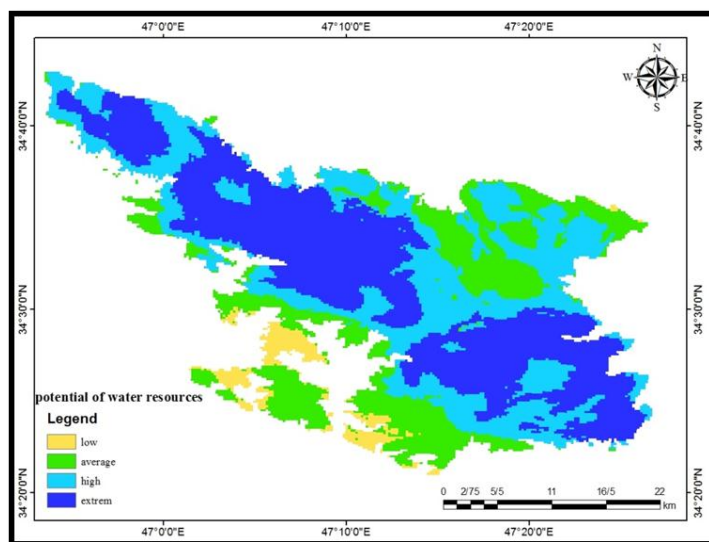
شکل ۵. نقشه معیارهای استفاده‌شده برای پتانسیل منابع آب توده کارستی پراو-بیستون



شکل ۶. نمودار فازی معیارهای استفاده شده در تعیین پتانسیل منابع آب کارست منطقه مطالعه شده



شکل ۷. وزن معیارهای استفاده شده در پهنه بندی پتانسیل منابع آب کارست توده پرآو-بیستون



شکل ۸. نقشه پتانسیل منابع آب توده کارستی پرآو-بیستون

جدول ۲. مساحت و درصد هریک از طبقات پتانسیل منابع آب توده پراو-بیستون

مجموع	پتانسیل خیلی زیاد	پتانسیل زیاد	پتانسیل متوسط	پتانسیل کم	مساحت (Km ²)
۹۰۲/۰۸	۳۷۱/۰۸	۲۹۰/۶۴	۲۰۴/۲۰	۳۶/۱۶	
۱۰۰	۴۱/۱۴	۳۲/۲۲	۲۲/۶۴	۴	درصد (/)

بحث و نتیجه‌گیری

تلفیق و تحلیل نقشه‌های موضوعی مختلف و تصاویر ماهواره‌ای ابزار مفیدی برای تعیین مناطق پتانسیل آب زیرزمینی در محیط‌های کارستی محسوب می‌شوند. در مطالعه حاضر، از تلفیق داده‌های صحرایی، نقشه‌های موضوعی مختلف و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در توده پراو-بیستون استفاده شده است. عوامل مؤثر در تعیین پتانسیل منابع آبی کارست شامل شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی، تراکم گسل، تراکم آبراهه، بارش و ارتفاع است. تیپ کربناته، رخساره کلسیک و قرارگرفتن چشمه‌ها در قسمت چپ نمودار پایپر بیان‌کننده کارستی بودن چشمه‌های منطقه مطالعه شده است. همچنین، بررسی نسبت مولار تأییدکننده وجود سنگ آهک در منطقه تغذیه چشمه‌هاست.

بررسی نقشه نهایی، بیان می‌کند که حدود ۷۳ درصد از منطقه مطالعه شده، پتانسیل منابع آب زیاد و خیلی زیاد دارد. طبقه با پتانسیل زیاد منطبق بر دامنه ارتفاعات منطقه بوده و طبقه با پتانسیل خیلی زیاد از نظر سنگ‌شناسی منطبق بر واحد سنگی آهک بیستون با خالص‌ترین نوع آهک در منطقه مطالعه شده و بخش‌هایی از رادیولاریت‌هاست. این طبقه به صورت نواری، قسمت‌های مرکزی منطقه مطالعه شده را شامل می‌شود. بسیاری از کوه‌های مهم منطقه مانند بیستون، پراو و نجیبران در این طبقه قرار می‌گیرند. بیشترین میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در این بخش صورت می‌گیرد، چرا که علاوه بر بیشترین میزان تراکم گسل و بارش زیاد مناسب‌ترین شرایط جهت ایجاد و توسعه فروچاله‌های کارستی را دارد که با مشاهدات میدانی نیز مطابقت دارد. در کل، چشمه‌های پرآبی مانند سرابله، بیستون، برناج، شاه حسین و ورمنجه در دامنه طبقات با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده برآورد مناسب مدل از مناطق با پتانسیل بالای منابع آب کارست است. در میان چشمه‌های با دبی بالا فقط چشمه طاق بستان در طبقه با

در پایان، با تلفیق نقشه‌های پایه و اجرای مدل Topsis، نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل منابع آب کارست توده پراو-بیستون به دست آمد (شکل ۸). این نقشه با استفاده از روش دستی (manual) به چهار طبقه با پتانسیل کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شده است، به طوری که طبق نقشه‌های موجود بیشترین تطابق را با وضعیت ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده داشته باشد. جدول ۲، درصد و مساحت هر یک از پهنه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات جدول ۲، حدود ۷۳ درصد از منطقه مطالعه شده پتانسیل بالایی از نظر منابع آب کارست دارد.

کمترین مساحت منطقه مطالعه شده را طبقه با پتانسیل کم منابع آب به خود اختصاص می‌دهد که منطبق بر رسوبات آبرفتی عهد حاضر است و نقش چندانی در پتانسیل منابع آب کارست و شکل‌گیری اشکال کارستی منطقه مطالعه شده ندارد، اما به دلیل قرارگیری در حاشیه ارتفاعات منطقه می‌تواند مکان مناسبی برای ظهور چشمه‌ها باشد. این طبقه همچنین کمترین میزان از نظر بارش و تراکم گسل‌ها را دارد. طبقه با پتانسیل متوسط نیز به صورت پراکنده شامل قسمت‌های شمال شرقی و جنوب غربی بوده و حدود ۲۳ درصد از مساحت منطقه مطالعه شده را به خود اختصاص داده است. این طبقه بیشتر منطبق بر آهک‌هایی با ترکیبی از شیل و مارن و بخشی از افیولیت ملانژها و قسمت‌هایی از آهک ضخیم‌لایه بیستون است که از نظر شکستگی‌ها و میزان بارش ضعیف‌اند. طبقه با پتانسیل زیاد منطبق بر دامنه ارتفاعات منطقه بوده و منطبق بر آهک‌هایی با ترکیبی از مارن و ماسه‌سنگ، رادیولاریت‌ها با ترکیبی از آهک‌های سیلیسی و فسفیل‌دار و قسمت‌هایی از آهک بیستون است. تفاوت اصلی این طبقه با پتانسیل منابع آب خیلی زیاد در تراکم پایین گسل‌ها و شکستگی‌ها در این طبقه است. طبقه با پتانسیل خیلی زیاد به صورت نواری قسمت‌های مرکزی منطقه مطالعه شده را شامل می‌شود. بسیاری از کوه‌های مهم منطقه مانند بیستون، پراو و نجیبران در این طبقه قرار می‌گیرند.

گیاهی و اندازه درز و شکافها رابطه مستقیمی وجود دارد و پوشش گیاهی سبب افزایش درز و شکافها می شود و نفوذ را به حد چشمگیری افزایش می دهد. در کل، پهنه بندی یک سازند کارستی به محدوده های رده بندی شده با ارزش های متفاوت، به این معنا نیست که به طور قطع، در محدوده های دارای ارزش پتانسیلی بالا، میزان آب بیشتری وجود دارد (و یا به عکس) و این فقط درصد احتمالات و میزان شانس موفقیت در وجود منابع آبی را بیان می کند. مشخص کردن بهترین منطقه ها مستلزم انجام بررسی های دقیق تری همچون اکتشاف های ژئوفیزیکی و سپس حفاری های اکتشافی است.

پتانسیل متوسط قرار می گیرد که آن هم به احتمال زیاد از آبخوان های دوردست تر تغذیه می شود که البته نیاز به بررسی های بیشتر و شناسایی مناطق تغذیه آبخوان چشمه مد نظر دارد. نقشه نهایی، بیان کننده تأثیر زیاد دو عامل سنگ شناسی و گسل ها در طبقه بندی پتانسیل منابع آب کارست هستند به طوری که طبقات با پتانسیل بالا منطبق بر سازندهای ضخیم لایه آهکی با تراکم زیاد گسل ها و شکستگی های محلی هستند که با مطالعات کاظمی و همکارانش [۲۵] و بالوکرایا و کالیمونا [۲۶] مطابقت دارد. همچنین، براساس مشاهدات میدانی و نتایج به دست آمده از پژوهش اختصاصی و همکارانش [۲۷]، بین پوشش



شکل ۹. نمونه اشکال کارستی توده پرآو-بیستون: الف و ب) لایه (کارن): الف) دامنه جنوبی طاق بستان و ب) دامنه کوه بیستون، ج) طاق سنگی: ارتفاعات پرآو، د) فروچاله (دولین): ارتفاعات پرآو، ی) غار مر تاریک در دامنه کوه بیستون

منابع

- [1]. Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arab. J. Geosci.* 2014; 7(2):711–724.
- [2]. Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R. A comparative assessment between three machine learning models and their performance comparison by bivariate and multivariate statistical methods in groundwater potential mapping. *Water Resour. Manag.* 2015;229 (14):5217–5236.
- [3]. Nampak, H., Pradhan, B., Manap, M.A. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *J. Hydrol.* 2014; 513:283–300.
- [4]. Rahmati, O., Pourghasemi, H., Melesse, A. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential Mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena.* 2016; 137: 360–372.
- [5]. British Columbia, Ministry of Forests. Karst management Handbook for British Columbia. 2003. www.publications.gov.bc.ca.
- [6]. Ford, D., Williams, P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John & Sons, Ltd. 2007.
- [7]. LaMoreaux, P. E. History of karst hydrogeological studies, Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas -I.G.U.- U.I.S.- Italy 15-27 Sept. 1991 ; Quaderni del Dipartimento di Geografia n. 13, 1991 -Università di Padova, pp. 215- 229.
- [8]. Magesh NS, Chandrasekar N, Soundranayagam JP. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *GSF.* 2012; 3(2):189-196. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007>.
- [9]. Preeja KR, Sabu J, Jobin T, Vijith H. Identification of groundwater potential zones of a Tropical River basin (Kerala, India) using remote sensing and GIS techniques. *J Indian Soc Remote Sens.* 2011; 39(1): 83–94 <https://link.springer.com/article/10.1007/s12524-011-0075-5>.
- [10]. Rassam DW, Pagendam DE, Hunter HM. Conceptualisation and application of models for groundwater–surface water interactions and nitrate attenuation potential in riparian zones. *Environ Modell Software.* 2008;23:859–875. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.11.003>.
- [11]. Magesh NS, Chandrasekar N, Soundranayagam JP. Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu India: a GIS approach. *Environ Earth Sci.* 2011; 64:373–381. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0860-4>.
- [12]. Shaban A, Khawlie M, Abdallah C. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone: the case of occidental Lebanon. *Hydrogeol J.* 2006; 14(4):433–443. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6>
- [13]. Thomas J, Joseph S, Thrivikramji K, Abe G, Kannan N. Morphometrical analysis of two tropical mountain river basins of contrasting environmental settings, the southern western Ghats, India. *Environ Earth Sci.* 2012;66(8):2353–2366. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1457-2>.
- [14]. Senthil-Kumar GR, Shankar K. Assessment of groundwater potential zones using GIS. *Front Geosci.* 2014; 2(1):1–10.
- [15]. Etishree A., Rajat A., Garg RD., Garg PK. Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. *Journal of Earth System Science.* 2013; 122(3): 887-898. Doi: 10.1007/s12040-013-0309-8.
- [16]. Kumar, U., B. Kumar and M. Neha. Groundwater Prospects Zonation Based on RS and GIS Using Fuzzy Algebra in Khoh River Watershed, Pauri-Garhwal District, Uttarakhand, India. *Global Perspectives on Geography (GPG).* 2013; Vol. 1: 37-45.
- [17]. Waikar, M.L., A. P. Nilawar. Identification of Groundwater Potential Zone using Remote Sensing and GIS Technique, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.* 2014; Vol. 3:12163-12174.
- [18]. Dashti barmaki, M. Rezaee, M. and Ashjari, J. Potentiality of water resources of karst mountains of Devon and Shapur based on multi-criteria decision making. *Journal of Iran water researches.* 2015;16: 89-100. (In Persian).
- [19]. Razavi Termeh S.V. Mesgari M.S. Kazemi K. Evaluation and comparison of frequency ratio, statistic index and entropy methods for groundwater potential mapping using GIS (Case Study: Jahrom Township). *Iranian Journal of Ecohydrology,* 2017; 4(3): 725-736. doi: 10.22059/ije.2017.62505. (in persian)

- [20]. Maleki, A. Oveisee moaakher, M. and Baghri, A. Investigating the capacity of groundwater resources in karstic formation of khorin kermanshah mountain using GIS technique and geophysical methods. *Geography and Environmental Planning*. 2017; 1:135-150. (In Persian)
- [21]. Afrasiabian, A. Karst hydrology studies in Maharloo calcareous basin. The second scientific seminar on water resources studies. Collection of articles. 1991; 126-137. (In Persian)
- [22]. Braud, J. LA suture du Zagros au niveau de Kermanshah (Kurdistan Iranian): Mem Geodiffusion. 1989; 5, 489P., 125 Fig, 1, Carte H, T., Paris.
- [23]. Karimi vardanjani, H. Karst Hydrogeology (concepts and methods) (1th Ed.). Eram of Shiraz Press. 2010;28-29. (In Persian).
- [24]. Darvari Z., Gholami V., Jokar Sarhangei E. Simulation of Karst Springs Discharge Using Artificial Neural Network (Case Study: Central Alborz Highlands). *Physical Geography Researches*. 2012;43(77): 57-68. (In Persian).
- [25]. Kazemi, R. Ghayomian, J. and Jalali, N. Investigating the role of structural factors in the frequency of water resources in the Lar karstic region using remote sensing and GIS. *Journal of Research and Innovation in Natural Resources*. 2006; 19(3): 33-41. (In Persian)
- [26]. Ballukraya, P. N., and Kalimuthu, R. Quantitative hydrogeological geomorphological analyses for groundwater potential assessment in hard rock terrains. *Current Science*. 2010;98. No2.
- [27]. Ekhtesasi, M. Sehati, M. Mosleharayee, A. and Azimzadeh, H. The effect of some characteristics of stone andesite and granite units on the amount of vegetation deposition in arid regions (A case study of Mehriz Yazd). *Journal of Watershed researches*, 2011; 92, 32-44. (In Persian)