

## مکان‌یابی مناطق مستعد چشمه‌های کارستی حوضه کبگیان با استفاده از الگوریتم آنتروپی بیشینه شانون

محسن فرزین\* - استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج.  
محمدتقی آوند - دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۲      تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲

### چکیده

هدف از این پژوهش، ارزیابی و بررسی توانایی مدل آماری آنتروپی شانون در تعیین مناطق مستعد حضور چشمه در حوزه آبخیز کارستی کبگیان یاسوج بوده است. برای انجام این پژوهش، ۳۸۴ نقشه حضور چشمه انتخاب شدند که به دو دسته ۷۰ درصد (۲۶۹ مکان چشمه) برای مدلسازی و ۳۰ درصد (۱۱۵ مکان چشمه) برای ارزیابی تقسیم شدند. همچنین ۱۷ لایه تاثیرگذار بر منابع آب زیرزمینی شامل عوامل فیزیوگرافی، هیدرولوژیک، هواشناسی، توپوگرافی و زمین‌شناسی، تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی اصلاحات، آماده‌سازی لایه‌ها، طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل‌ها و استخراج نقشه‌های موردنظر با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS® 10.5، PCI Geomatica® 2018، MaxEnt® 3.3.3، SAGA GIS و Google Earth Pro 9 انجام گردید. نتایج ارزیابی مدل آنتروپی شانون نشان دهنده دقت خیلی خوب این مدل با سطح زیر منحنی ROC برابر با ۸۲/۷ درصد است. همچنین نتایج نشان داد که فاکتورهای ارتفاع، فاصله عمودی تا شبکه کانال، بارش، موقعیت توپوگرافی و پوشش گیاهی به ترتیب بیشترین تاثیر و فاکتورهای برآیند بردار، جهت دامنه، انحناء دامنه، تراکم گسل و تراکم خطواره کمترین تاثیر را در تعیین مناطق دارای پتانسیل حضور چشمه در این منطقه دارند. شاخص سنگ‌شناسی حوضه تاثیر میانه در پیش‌بینی مدل، داشته است. طبق نقشه پتانسیل حضور چشمه، نواحی با پتانسیل زیاد، متوسط و کم، به ترتیب، ۱۸۹۴، ۲۱۷۹۵ و ۶۳۶۳۷ هکتار از سطح حوضه را دربرگرفته است که به ترتیب، ۲/۲، ۲۵ و ۷۲/۸ درصد از حوضه را شامل می‌شود. نواحی با پتانسیل زیاد عمدتاً در ارتفاعات سازندهای کارستی آسماری و گچساران قرار گرفته است. به طور کلی، مدل آنتروپی بیشینه شانون توانایی خیلی خوبی (۸۲/۷ درصد) در تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی نشان داد، بنابراین مدیران و کارشناسان منابع آب می‌توانند از نتایج به دست آمده در این مطالعه به منظور صرفه جویی در وقت و هزینه برای شناسایی مناطق مستعد چشمه استفاده کنند و با زمان و هزینه کمتری به عملکرد بهتری دست پیدا کنند.

واژگان کلیدی: چشمه، آنتروپی شانون، سازندهای کارستی، حوزه آبخیز کبگیان.

## مقدمه

اکتشاف منابع آب زیرزمینی، همواره یکی از مهمترین دغدغه‌های بشر بعد از پیدایش کشاورزی، به ویژه در مناطق خشک، بوده است؛ به طوری که بشر با روش‌های تجربی مبتنی بر نشانه‌های موجود در سطح زمین، به حضور منابع آب زیرزمینی پی برده است. آب زیرزمینی از یک سو به دلیل شیرین بودن، ترکیبات ثابت شیمیایی، دمای ثابت، ضریب آلودگی کمتر و سطح اطمینان بیشتر به عنوان یک منبع قابل اتکا به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود و از سوی دیگر با تأثیر بر توان اکولوژیک سرزمین پدیده‌ای مهم و مؤثر در توسعه اقتصادی، تنوع اکولوژیکی و سلامت جامعه به حساب می‌آید (مادان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

چشمه‌ها به عنوان نقاط تخلیه مخازن آب زیرزمینی، مهمترین نشانه سطحی حضور منابع آب زیرزمینی در حوضه‌های مختلف قلمداد می‌گردند. معمولاً چشمه‌ها وقتی تشکیل می‌شوند که رسوبات نفوذپذیر مانند قلوه‌سنگ، شن و ماسه، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و غیره روی رسوبات غیر قابل نفوذ قرار گرفته باشد و همچنین آبهای زیرزمینی از محل‌هایی که دارای مقاومت کمتری بوده مانند درز، شکاف و یا گسل‌ها خارج می‌شوند (قربانی، ۱۳۹۴). البته نوع گسل و وضع زمین-شناسی در تعیین این مسیر اهمیت خیلی زیادی دارد. یکی از مهم‌ترین نوع چشمه‌ها، چشمه‌های کارستی می‌باشد که نسبت به سایر اشکال کارستی دارای اهمیت بیشتری است؛ به طوری که در همه مناطق کارستی، بسیاری از ابتدایی‌ترین روستاها و شهرها در مجاورت آنها متمرکز بوده است. در حال حاضر، بخش زیادی از جمعیت شهری و روستایی به شدت به منابع آب کارستی وابسته هستند. برای مثال، حدود ۳۵ درصد از سطح اروپا را اراضی کربناته به خود اختصاص داده و شهرهای مهمی به طور کامل یا نسبی با آب‌های کارستی تامین می‌شوند؛ فقط در جنوب چین، بیش از ۱۰۰ میلیون نفر بر روی کارست زندگی می‌کنند (فورد و ویلیامز<sup>۲</sup>، ۲۰۰۷). همچنین بیش از ۲۰ درصد از سطح ایالات متحده آمریکا توسط سنگ‌های کربناته اشغال شده است به طوری که حدود یک سوم از آب شرب آن کشور از آبخوان‌های کارستی تامین می‌شود (دیویس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۲).

در کشور ما نیز بیش از ۸۵ درصد از مناطق جنوب آب مورد نیاز خود را از منابع آب کارست تامین می‌کند (افراسیابیان، ۱۳۷۷). به طور کلی، حدود ۱۱ درصد از کشور ایران را سازندهای کربناته به خود اختصاص می‌دهند؛ توزیع این سنگ‌ها در کشور یکنواخت نبوده و بیشترین گسترش سنگ‌های کربناته به زون زاگرس اختصاص دارد، به طوری که بیش از ۵۵ درصد از سازندهای کربناته کارستی ایران را در برمی‌گیرد (رئیسی، ۲۰۰۲، آوند و اختصاصی، ۲۰۲۰). از این رو، تعیین پتانسیل منابع آب نواحی کارستی را می‌توان یکی از مهمترین اهداف مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز کشور دانست. عوامل متعددی در پدیده کارستی شدن سازندهای کربناته نقش دارند که از مهمترین آنها می‌توان به مواردی از قبیل سنگ‌شناسی، میزان نزولات آسمانی، خصوصیات چینه‌شناسی، عوامل ساختاری و توپوگرافی منطقه اشاره کرد. از بین عوامل مختلف تاثیرگذار در توسعه کارست، سنگ‌شناسی و خصوصیات چینه‌شناسی سازندهای موجود در منطقه مورد نظر از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در مناطقی که سنگ‌های آهکی ضخیم لایه و توده‌ای وجود دارد، معمولاً پدیده کارستی شدن با شدت بیشتری انجام می‌شود (ملکی و اویسی، ۱۳۹۱).

تاکنون روش‌ها و مدل‌های زیادی برای تعیین نواحی مستعد حضور چشمه و منابع آب زیرزمینی بر مبنای ویژگی‌های محیطی بکار گرفته شده است؛ از جمله: نسبت فراوانی (بیابانی و همکاران، ۱۳۹۹)، تصمیم‌گیری چندمعیاره و منطق فازی (یمانی و علی‌زاده، ۱۳۹۳؛ عباسی و حیدری، ۱۳۹۵)، رگرسیون چند متغیره و تحلیل عاملی (نظری سامانی و همکاران،

<sup>۱</sup>. Madan

<sup>۲</sup>. Ford and Williams

<sup>۳</sup>. Davis

(۱۳۹۸)، رگرسیون لجستیک (نظری سامانی و همکاران، ۱۳۹۶)، داده‌کاوی (آوند و همکاران، ۱۳۹۸)، شاخص آماری (رضوی ترمه و همکاران، ۱۳۹۶) و مکسنت (تیموری و اسدی نلیوان، ۱۳۹۹). مدل آنتروپی بیشینه شانون، یکی از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین است که بر مبنای نقاط بود یا حضور، عدم قطعیت ناشی از نبود نقطه مورد نظر را حذف می‌کند (فیلیپس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). در واقع، این مدل با دو ورودی نقاط حضور به عنوان متغیر وابسته و لایه‌های اطلاعات محیطی به عنوان متغیرهای مستقل احتمال حضور نقطه را در کل محدوده مورد مطالعه برآورد می‌کند. طی دهه اخیر، با توجه به اهمیت مناطق کارستی در تغذیه آبهای زیر زمینی، تحقیقات مختلفی در رابطه با کارست در جهان، ایران و به ویژه زاگرس انجام شده است که در ادامه چند مورد از این مطالعات شرح داده شده است:

تیموری و اسدی نلیوان (۱۳۹۹) مهمترین عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی آبخیز پیرانشهر (آذربایجان غربی) را با استفاده از مدل آنتروپی شانون تعیین کردند و به نتیجه رسیدند که مرکز حوضه مورد مطالعه بیش از ۳۳ درصد از پتانسیل منابع آب زیرزمینی را دارا می‌باشد. رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) کارایی مدل بیشینه آنتروپی را در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آبکندی حوزه آبخیز کشکان-پلدختر را ارزیابی کرده و دقت پیش‌بینی با این روش را مورد تایید قرار دادند. کرسینی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، محل چشمه‌های آب زیرزمینی در آلپ‌های شمال ایتالیا را بر اساس شواهد وزنی و شبکه بهم پیوسته شعاعی ترسیم نموده و به نقش گسل‌ها در ایجاد این چشمه‌ها تاکید کردند. گلن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، با بررسی نقش گسل‌ها در کنترل موقعیت مکانی چشمه‌های آب گرم دریافتند که مهمترین چشمه‌های آب گرم در نزدیک جابجایی‌های ساختاری قرار دارند.

بهرامی و همکاران (۱۳۹۵)، با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی به ارزیابی توسعه کارست در زاگرس پرداختند. نتایج نشان دهنده ارتباط نزدیک بین سنگ‌شناسی و شکستگی‌ها با رفتار هیدرولوژی سیستم آب زیرزمینی در زاگرس چین خورده و عدم ارتباط نزدیک بین شکستگی و سنگ‌شناسی در سیستم رورانده است. تیموری و اسدی نلیوان (۱۳۹۸) عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در استان لرستان را با استفاده از مدل آنتروپی بیشینه، اولویت‌بندی و تعیین حساسیت کردند و به این نتیجه رسیدند که ۳۵/۵ درصد از استان، حساسیت وقوع زمین‌لغزش دارد؛ ایشان لایه‌های بارندگی، فاصله از جاده، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی را مهمترین عوامل تاثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش می‌دانند. اکبری و ارشادی مقدم (۱۳۹۳)، با بررسی ارتباط پراکنش چشمه‌ها با گسل‌ها از طریق GIS در ارتفاعات شمالی و جنوبی دشت سبزواری نشان دادند؛ بین گسل‌ها با چشمه‌ها و چشمه‌ها با شیب و ارتباط سطوح ارتفاعی، ارتباط مستقیم وجود دارد و گسل‌ها می‌توانند در پیش‌بینی ظهور و از بین رفتن چشمه‌ها و همچنین میزان افزایش یا کاهش آب چشمه‌ها برای برنامه ریزی‌های آینده لحاظ شوند. عباسی و همکاران (۱۳۹۳)، با استفاده از مدل آنتروپی به پهنه بندی تحول کارست در شمال باختری زاگرس پرداختند. نتایج حاصله حاکی از کارایی مطلوب مدل آنتروپی در پهنه‌بندی تحول کارست می‌باشد. در حوزه آبخیز کبگیان شغل و درآمد اصلی مردم کشاورزی به خصوص کشت برنج و گندم می‌باشد که آب مورد نیاز این کشاورزان از رودخانه موجود در این منطقه تامین می‌گردد. همچنین دبی رودخانه اصلی در این منطقه از طریق چشمه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه که غالباً چشمه‌های کارستی است، تامین می‌شود. بنابراین لزوم توجه به منابع آب موجود در این منطقه به خصوص منابع آب کارستی ناشی از چشمه‌ها که منبع اصلی تامین آب است، ضروری دارد. از این رو، در این پژوهش برای اولین بار در این منطقه اقدام به شناسایی و تعیین مناطق مستعد و دارای پتانسیل چشمه کارستی شده است. برای انجام این کار قابلیت روش آماری آنتروپی شانون و سیستم اطلاعات جغرافیایی در تعیین مناطق مستعد چشمه

<sup>۱</sup> . Phillips

<sup>۲</sup> . Corsini

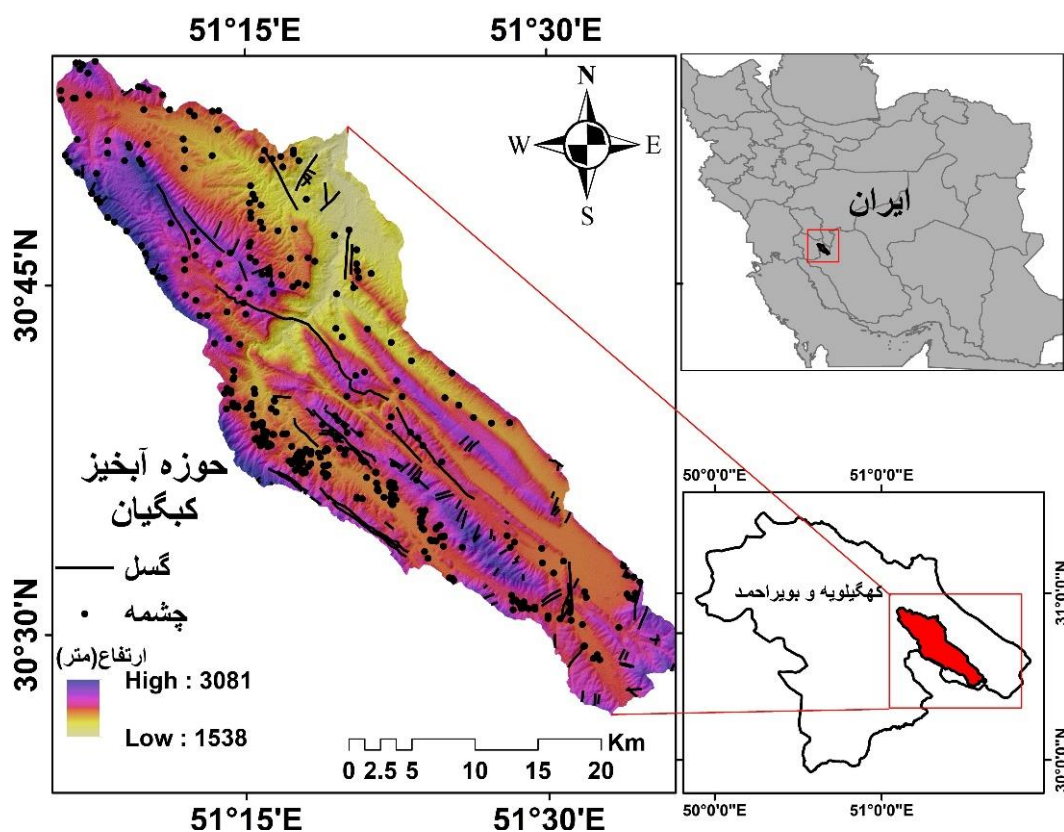
<sup>۳</sup> . Glen

کارستی مورد ارزیابی قرار گرفته است، که مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب یاسوج می‌توانند از نتایج آن برای مدیریت بهتر منابع آب کارستی منطقه استفاده کنند.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

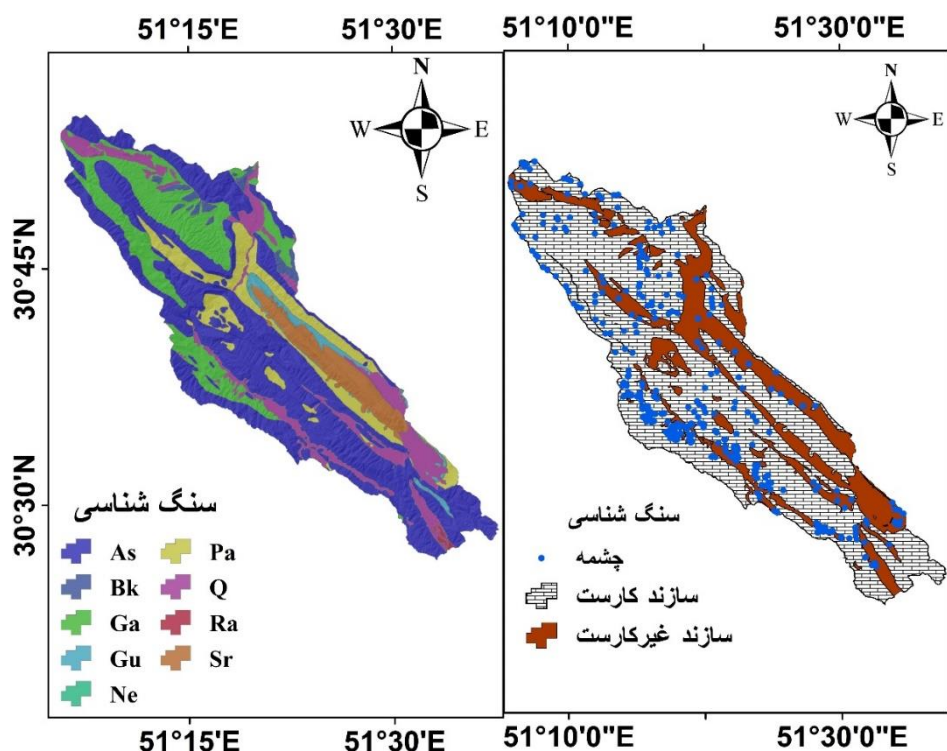
حوزه آبخیز کبگیان با مساحت ۸۷۳۲۶ هکتار در زیرزون زمین‌شناسی زاگرس چین‌خورده و در نیمه جنوبی شهرستان بویراحمد واقع شده و در موقعیت ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه حوضه به ترتیب ۳۰۸۱ و ۱۵۳۸ متر از سطح دریا بوده و اقلیم آن سرد مرطوب است. متوسط بارش و دمای حوضه، به ترتیب، ۷۸۷ میلی‌متر و ۱۳ درجه سانتی‌گراد است. رودخانه کبگیان با عبور از چندین روستا به رودخانه بشار (به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کارون بزرگ) می‌پیوندد. بر اساس نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور، زمین‌شناسی این حوضه به اواسط دوران مزوزوئیک تا عهد حاضر باز می‌گردد و سنگ‌شناسی آن، از قدیم به جدید، سازندهای نیریز، سروک، گورپی، پایده، آسماری، گچساران، رازک، بختیاری و کواترنری را دربردارد (شکل ۲ و جدول ۱).



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه در استان و ایران همراه با پراکنش گسل‌ها و

جدول ۱: سازندهای زمین‌شناسی برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور

پتانسیل کارستی شدن	مساحت		نام سازند	سنگ- شناسی	علامت	سن		
	درصد	هکتار (ha)				دور	دوره	دوران
-	۱۱/۷۷	۱۰۲۸۲	کواترنری	نهشته‌ته‌های کواترنری	Q	-		کواترنر
-	۱/۸۴	۱۶۰۵	بختیاری	کنگومرا، کنگومرای مارنی ماسه‌ای	Bk		پلیستوسن	سنوزوئیک ترسیر
-	۰/۲۶	۲۲۳	رازک	مارن، کنگومرا، ماسه سنگ سرخ و گچ	Ra		میوسن	
*	۱۷/۳۶	۱۵۱۶۴	گچساران	مارن، انیدریت و نمک	Gs		میوسن	
*	۴۹/۶۳	۴۳۳۳۹	آسماری	آهک درزه‌دار	As		الیگومیوسن	
-	۱۰/۷۸	۹۴۱۴	پابده	شیل آهکی و مارن	Pd		پالئوسن	
-	۲/۱۱	۱۸۴۱	گورپی	مارن، شیل و آهک نازک لایه	Gu		کامپانین	مزوزوئیک کرتاسه
*	۶/۱۵	۵۳۷۱	سروک	آهک رسی	Sr		آلبین- تورونین	
*	۰/۱	۸۷	نیریز	سنگ آهک مارنی، دولومیت سیاه ماسه‌ای	Ne		لیاس	
۷۳/۳۶ درصد	۱۰۰	۸۷۳۳۶						جمع



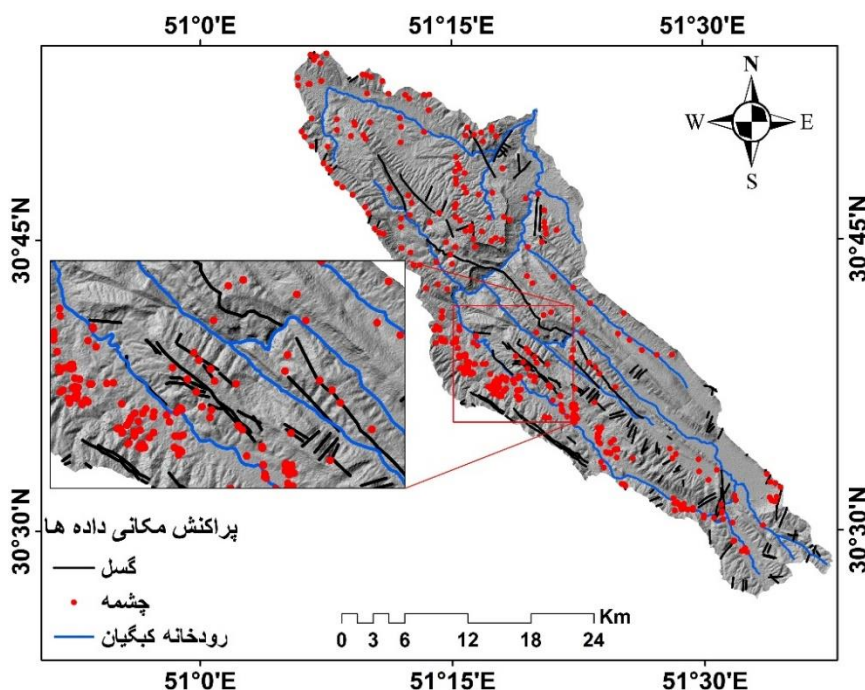
شکل ۲: نقشه واحدهای سنگ‌شناسی و نواحی کارستی و غیر کارستی حوزه آبخیز کبگیان

### داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به دو دسته متغیر وابسته (نقاط حضور چشمه) و لایه‌های اطلاعاتی محیطی تقسیم شدند. ۳۸۴ نقطه حضور چشمه (نقاط ۱) که توسط آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویر احمد به ثبت رسیده است، تهیه شد و به دو دسته ۷۰ درصد (مدلسازی) و ۳۰ درصد (اعتبارسنجی) تقسیم شدند (شکل ۳). همچنین بر اساس مرور منابع و مطالعات انجام شده ۱۷ عامل موثر بر تعیین مناطق پتانسیل چشمه شامل: جهت دامنه، تراکم خطواره، فاصله عمودی تا شبکه کانال (VDCN)، رطوبت توپوگرافی (TWI)، زبری توپوگرافی (TRI)، موقعیت توپوگرافی (TPI)، تراکم آبراهه، قدرت جریان، شیب دامنه، سطح واقعی (RSA)، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، انحناء دامنه (Curvature)، تراکم گسل، پوشش گیاهی (NDVI)، زبری توپوگرافی (VRM)، بارش و سنگ‌شناسی انتخاب شد (نگوین<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰؛ نقیبی و همکاران، ۲۰۱۷؛ فام<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). نقشه پایه برای انجام این کار مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۳۰ متر بود. تمامی اصلاحات، آماده‌سازی لایه‌ها، طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل‌ها و استخراج نقشه‌های موردنظر با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS<sup>®</sup> 10.5، PCI Geomatica<sup>®</sup> 2018، SAGA GIS، MaxEnt<sup>®</sup> 3.3.3، Google Earth Pro 9 و Excel 2016 انجام گردید.

1. Nguyen

2. Pham



شکل ۳: نقشه پراکنش مکانی چشمه‌های مورد استفاده و گسل خوردگی حوضه

### تئوری روش آنتروپی شانون

حضور چشمه در هر منطقه، پاسخی به برآیند عملکرد مجموعه‌ای از عوامل محیطی است. بنابراین، با ثبت نقاط بودن و حضور چشمه از یک طرف و تعیین و تهیه نقشه عوامل محیطی موثر از طرف دیگر، می‌توان نواحی پتانسیل و مستعد حضور چشمه و در نتیجه، منابع آب را پیش‌بینی کرد. یکی از الگوریتم‌هایی که بر مبنای نقاط حضور و فراوانی بودن، نقشه پتانسیل را پیش‌بینی می‌کند مدل آنتروپی بیشینه شانون است. تئوری آنتروپی شانون برای اولین بار توسط استفان بولتزمن مطرح و نهایتاً توسط شانون به صورت کمی ارائه گردید (شانون<sup>۱</sup>، ۱۹۴۸). آنتروپی در حقیقت بیانگر آن است که چگونه از بین عوامل موثر یک هدف، می‌توان مهمترین عوامل را تخمین زد یا به عبارتی متغیرهایی که بیشترین تاثیر را در رخداد یک واقعه دارند برای مشخص نماید (شانون، ۱۹۴۸). از آنجایی که در پهنه بندی پتانسیل آب زیرزمینی، بسته به شرایط منطقه معمولاً فاکتورهای مختلفی تاثیرگذار بوده و همچنین در تعیین میزان پتانسیل با استفاده از مدل‌های آماری دومتغیره و احتمالی نظیر بیازین، تمامی عوامل موثر بر پتانسیل چشمه وزن یکسانی دارند، لذا چنانچه یکی از عوامل تاثیر بیشتری داشته باشد میزان اثر آن نادیده گرفته می‌شود، بنابراین تئوری شانون می‌تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی تاثیر به سزایی در شناسایی عوامل موثر و میزان تاثیرگذاری آنها داشته باشد (امیری و همکاران، ۲۰۲۰؛ نو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). این مدل توسط نرم افزار مکسنت اجرا می‌شود (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۶) و احتمال توزیع آنتروپی بیشینه یافت می‌شود؛ به طوری که می‌توان از آن برای پیش‌بینی نواحی حضور متغیر وابسته در شرایط محیطی مختلف استفاده کرد. علاوه بر این، مدل آنتروپی شانون که از الگوریتم یادگیری ماشین با استفاده از اطلاعات حضور استفاده می‌کند را می‌توان در صورت محدود بودن داده‌های توزیع، مورد استفاده قرار داد و نقشه پتانسیل حضور را تهیه کرد (بای‌آن<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).

<sup>۱</sup>. Shannon

<sup>۲</sup>. Nhu

<sup>۳</sup>. Byeon

به طور کلی به منظور اولویت‌بندی عوامل موثر بر پتانسل چشمه از روش شانون، از روابط ۱ تا ۶ استفاده می‌گردد.

$$P_{ij} = \frac{b}{a} \quad (1)$$

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^j P_{ij}} \quad (2)$$

$$H_j = - \sum_{j=1}^j (P_{ij}) \log(P_{ij}), j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j \quad S_j - \text{number of classes} \quad (4)$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad (6)$$

که در این معادلات:

$P_{ij}$  تراکم چشمه هر طبقه،  $(P_{ij})$  احتمال تراکم چشمه هر عامل و کلاس‌های مرتبط،  $H_j$  و  $H_{jmax}$  مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی،  $I_j$  ضریب اطلاعات،  $W_j$  وزن نهایی هر عامل.

### ارزیابی مدل با معیار ROC

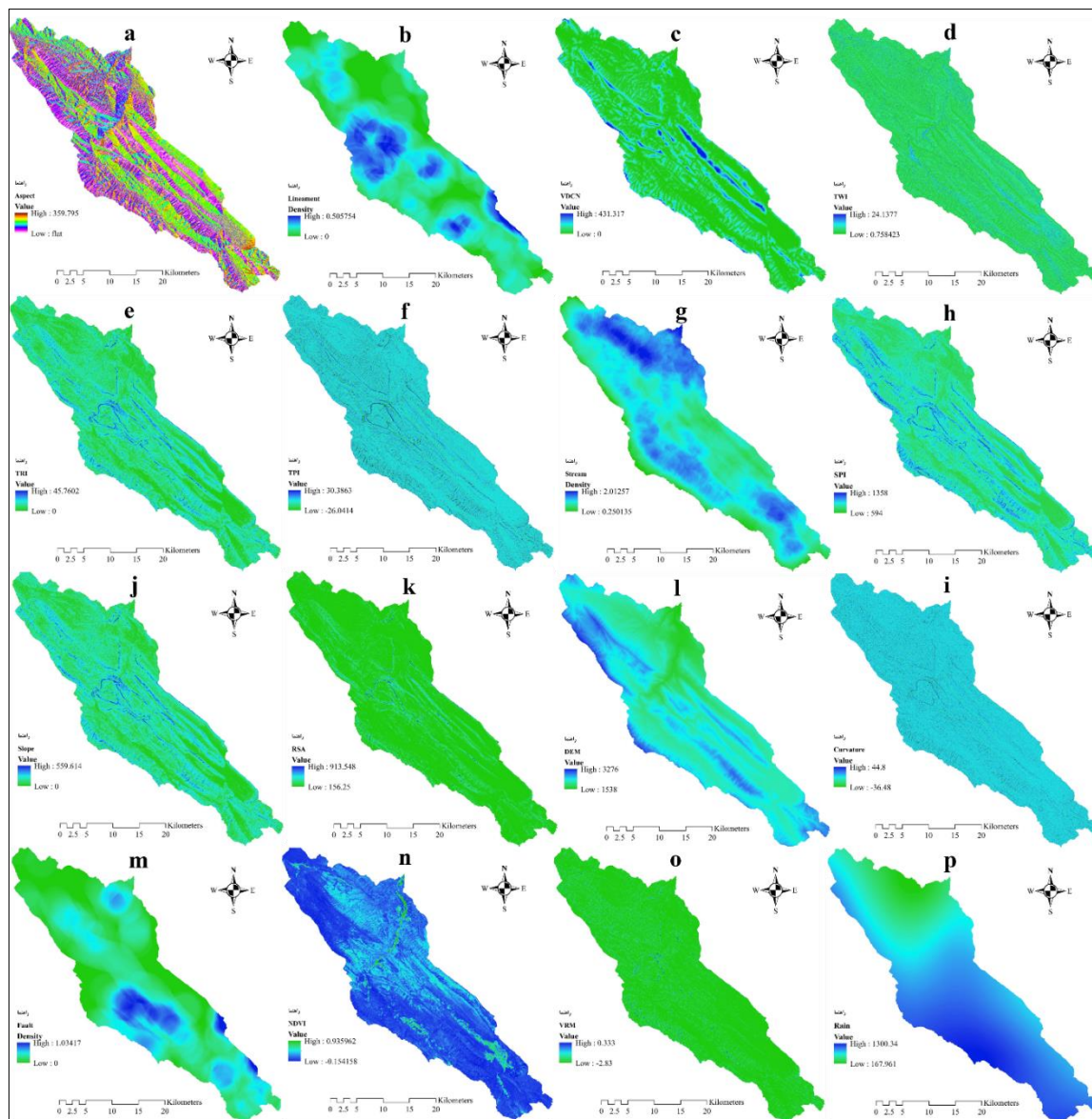
یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی مدل‌های آماری و یادگیری ماشین منحنی ROC می‌باشد. با توجه به اینکه برای ارزیابی مدل نمی‌توان همان نقاط چشمه که در پهنه‌بندی استفاده شده‌اند را به کار برد، از بین نقاط چشمه ۷۰ درصد آنها را برای مدلسازی و ۳۰ درصد را برای ارزیابی در نظر می‌گیرند. سپس از منحنی ROC صحت نقشه تهیه شده را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. این روش از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (آوند و همکاران، ۲۰۲۰). سطح زیر منحنی ROC که AUC نامیده می‌شود، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداد و عدم رخداد است. مقدار AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. هر چه سطح منحنی به یک نزدیکتر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است (یاریان و همکاران، ۲۰۲۰؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۲۰).

### نتایج و بحث

شکل ۴ نقشه شاخص‌های محیطی مورد استفاده در مدل آنتروپی شانون را نشان می‌دهد. لایه‌های موضوعی مختلفی، از قبیل: زمین‌شناسی، توپوگرافی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و پوشش اراضی جهت شناسایی نواحی با پتانسیل آب زیرزمینی کارستی مورد استفاده قرار گرفتند که شامل: جهت، تراکم خطواره، فاصله عمودی تا شبکه کانال (VDCN)، رطوبت توپوگرافی (TWI)، زبری توپوگرافی (TRI)، موقعیت توپوگرافی (TPI)، تراکم آبراهه، قدرت جریان (SPI)، درصد شیب، سطح واقعی (RSA)، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، انحناء دامنه، تراکم گسل، پوشش گیاهی، قدرت بردار (VRM) و بارش. دامنه ارتفاعی حوضه از ۳۲۷۶ متر در بلندترین نقطه تا ۱۵۳۸ متر در پست‌ترین نقطه قرار دارد. نیمه غربی حوضه گسل‌خوردگی بیشتری را نشان می‌دهد. خطواره در بخش مرکزی-نیمه جنوبی، بیشترین تراکم را در واحد سطح ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) دارد؛ فاصله عمودی تا مرکز دره به متر، به صورت خطوط آبی پررنگ نمایان است. تراکم آبراهه ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) در بخش غربی-نیمه شمالی بسیار زیاد است. علیرغم تفاوت مقدار شاخص‌های قدرت جریان و زبری توپوگرافی، به دلیل تاثیرپذیری بسیار زیاد این شاخص از شیب منطقه، تغییر نقشه آنها نیز منطبق با وضعیت شیب حوضه است. پوشش گیاهی



در بخش‌های مرکزی حوضه به دلیل وجود اراضی کشاورزی و باغی و در نواحی مرزی به دلیل وجود کوه‌های مرتفع و بروزندهای سنگی فراوان، به ترتیب، بیشتر و کمتر از سایر بخش‌ها است. بارش نیمه غربی حوضه بیشتر از نیمه شرقی است. بیش از ۷۳ درصد از سطح حوضه با رخنمون سازندهای کارستی (آهکی و گچی) شامل سازندهای آسماری، گچساران، سروک و نیریز پوشیده است (شکل ۲ و جدول ۱).

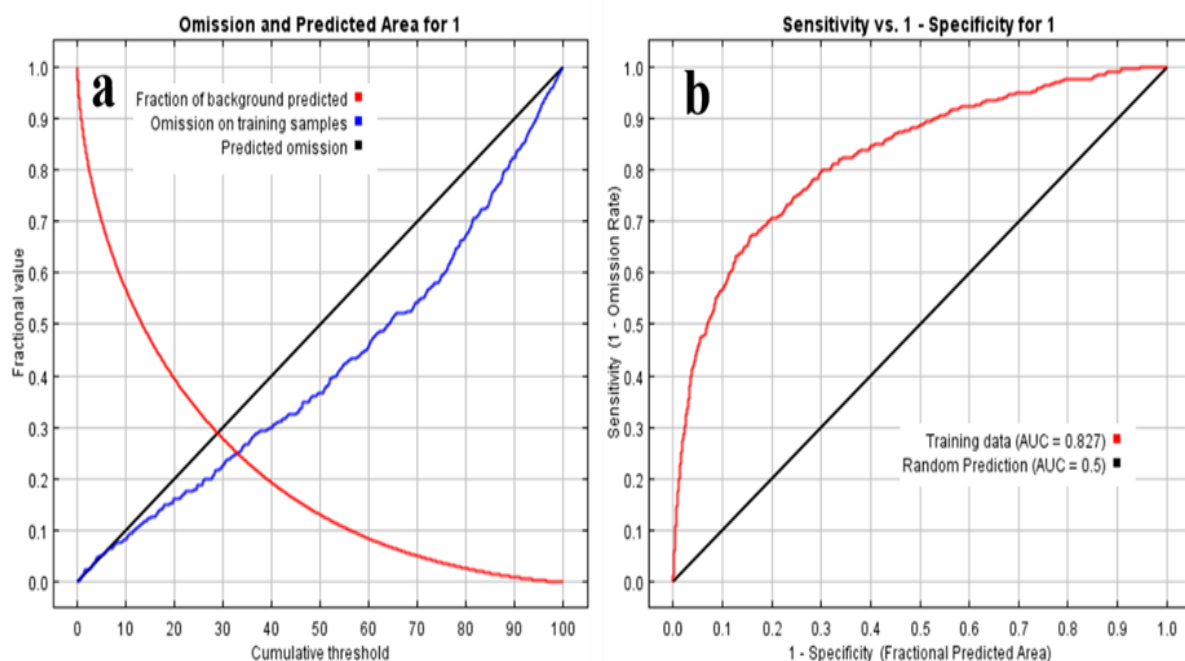


شکل ۴: نقشه شاخص‌های محیطی مورد استفاده شامل: (a) جهت، (b) تراکم خطواره، (c) VDCN، (d) TWI، (e) TRI، (f) TPI، (g) تراکم آبراهه، (h) قدرت جریان، (i) انحنا دامنه، (j) شیب، (k) سطح واقعی، (l) DEM، (m) تراکم گسل، (n) پوشش گیاهی، (o) بارش (p, VRM)

### اعتبارسنجی

برای پیش‌بینی و تعیین نواحی مستعد حضور چشمه با استفاده از الگوریتم آنتروپی بیشینه در حوضه کارستی کبگیان، ۱۷ لایه اطلاعات محیطی و موقعیت ۳۸۴ دهانه چشمه موجود در حوضه مورد استفاده قرار گرفت. صحت مدل مورد استفاده به وسیله سطح زیر منحنی مشخصه نسبی (AUC) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مدل دارای دقت خیلی خوبی ( $AUC=0/827$ ) در تعیین مناطق دارای پتانسیل چشمه می‌باشد (شکل ۴). نمودار حذف نمونه‌های آموزشی،

دارای اندکی گودافتادگی بوده ولی با این وجود، به دلیل انطباق کلی با نمودار حذف پیش‌بینی می‌توان بیان کرد که مدل قابل قبول می‌باشد (شکل ۵).

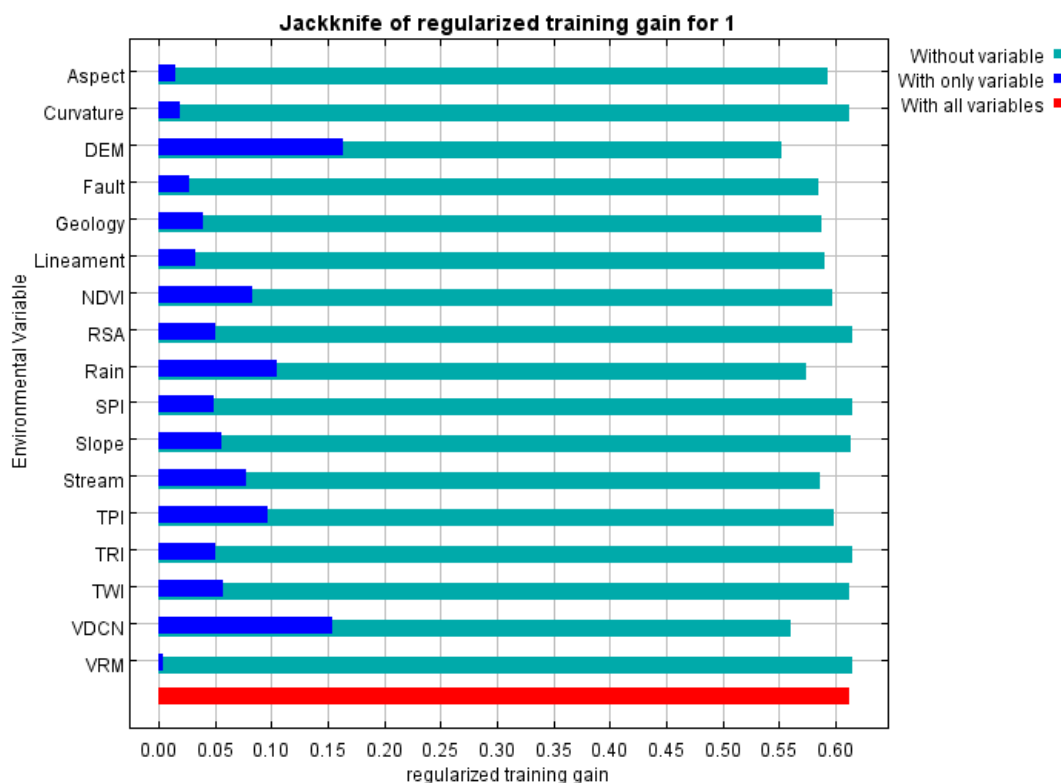


شکل ۵: (a) نرخ حذف در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده منحنی و (b) عملکرد نسبی (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) برای چشمه

آزمون چک‌نایف به عنوان یک روش ارزیابی با دقت بالا، پذیرفته شده است (وربیل و لیتویتیس<sup>۱</sup>، ۱۹۸۹) و برای تعیین اهمیت نسبی متغیرها استفاده می‌شود. طبق این آزمون (شکل ۶)، از میان ۱۷ متغیر محیطی، شاخص‌های، به ترتیب، مدل رقومی ارتفاع، فاصله تا شبکه کانال، میزان بارش، موقعیت توپوگرافی و پوشش گیاهی بیشترین تاثیر را در مدل‌سازی داشته‌اند. در واقع، با حذف متغیر ارتفاع، بیشینه کاهش در آموزش ایجاد می‌شود که نشان می‌دهد این شاخص دارای اطلاعاتی است که در سایر متغیرها یافت نمی‌شود (شعاعی و همکاران، ۱۳۹۶). با این وجود، هیچکدام از شاخص‌ها به تنهایی قادر به پیش‌بینی قابل قبول نبوده‌اند. کمترین تاثیرگذاری بر مدل‌سازی نیز به شاخص‌های، به ترتیب، برآیند بردار، جهت جغرافیایی، انحناء دامنه، تراکم گسل و تراکم خطواره اختصاص دارد. اینکه تراکم گسل و خطواره تاثیر چندانی در پیش‌بینی نقشه پتانسیل حضور چشمه نداشته است را می‌توان به دو دلیل توجیه کرد: ۱- تاثیرگذاری چشمگیر عامل ارتفاع بر نقشه پتانسیل چراکه ارتفاع مهمترین عامل موثر بر حضور چشمه بوده است هم به دلیل اینکه منابع آب کارست عمدتاً در ارتفاعات تمرکز دارند (کریمی وردنجانی، ۱۳۹۴) و هم به دلیل بارش بیشتر (به ویژه برف) در ارتفاعات رخ می‌دهد و ۲- از گسل‌ها و به طور کلی خطواره‌ها، به عنوان نقاط ضعف سطح زمین یاد می‌شود که تقریباً تمام جریان سطحی در این نواحی نفوذ می‌کند، بنابراین، این نواحی به عنوان نواحی تغذیه قلمداد می‌گردند. این در حالی است چشمه‌ها به ویژه چشمه‌های کارستی، در نواحی تخلیه دیده می‌شوند که ممکن است از نواحی تغذیه فاصله داشته باشند (فرزین و همکاران، ۱۳۹۹) یا اصلاً به این نواحی نرسند و در فاصله نزدیک‌تر و موثرتر از شکستگی، تخلیه شوند. از طرف دیگر، نوع گسل هم می‌تواند مسیر تخلیه جریان زیرزمینی را متاثر سازد؛ برای نمونه نتایج بهرامی و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند ارتباط نزدیک بین سنگ‌شناسی و شکستگی‌ها با رفتار هیدرولوژی سیستم آب زیرزمینی در زاگرس چین خورده وجود و بین شکستگی و

<sup>۱</sup>. Verbyla and Litvaitis

سنگ‌شناسی در سیستم رورانده ارتباط نزدیکی وجود ندارد. تاثیر شاخص سنگ‌شناسی حوضه در پیش‌بینی مدل، حد میانه داشته است؛ دلیل آن را می‌توان پوشش بیش از ۷۳ درصدی حوضه با سنگ آهک و گچ دانست که تاثیر نسبتاً یکنواختی بر مدلسازی داشته است؛ این حالت را می‌توان در منحنی پاسخ نیز مشاهده کرد که برای دو سازند آسماری و گچساران، پاسخ قابل توجهی داده شده است (شکل ۷).



شکل ۶: آنالیز حساسیت متغیرهای مستقل محیطی بر اساس آزمون جک‌نایف

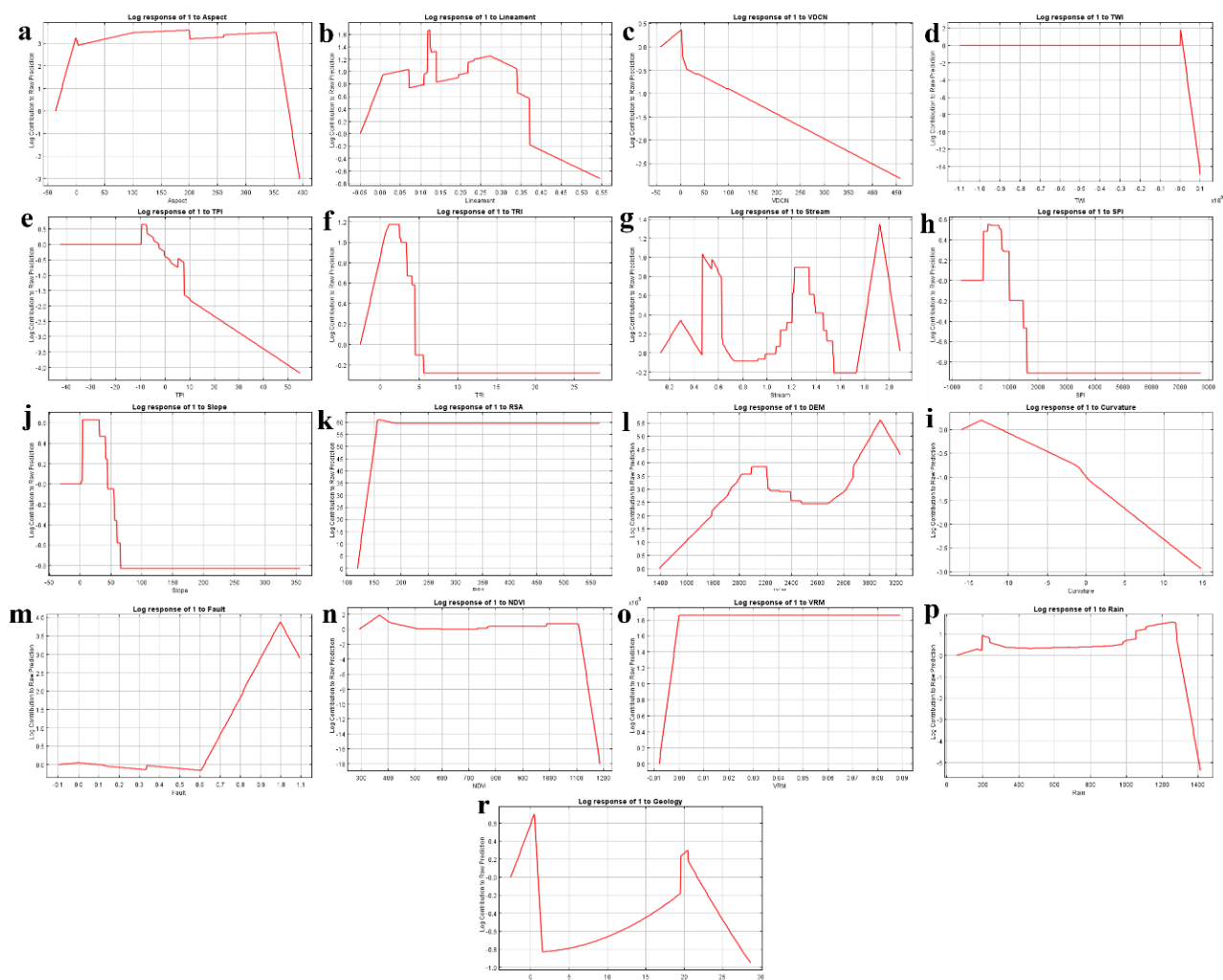
منحنی پاسخ و اثرگذاری هر کدام از شاخص‌ها برای پیش‌بینی توسط مدل آنتروپی شانون در شکل ۷ نشان داده شده است. منحنی پاسخ، رابطه میان متغیرهای محیطی و نواحی مستعد حضور چشمه را به صورت لگاریتمی نمایش می‌دهد. می‌توان تفسیر تاثیرگذاری متغیرها را مطابق این منحنی به ترتیب اثرگذارترین تا کمترین اثرگذاری به این صورت ارائه کرد: منحنی پاسخ ارتفاع ابتدا در دامنه ارتفاعی ۲۲۰۰-۲۰۰۰ متر افزایش می‌یابد، سپس تا ارتفاع ۲۷۰۰ متری کاهش می‌یابد و دوباره تا ارتفاع ۳۷۰۰ متری افزایش پیدا می‌کند؛ که این یافته‌ها با نتایج زندگی و همکاران (۱۳۹۴) در خصوص افزایش تراکم چشمه با افزایش ارتفاع در حوزه آبخیز کوهستانی میرده کردستان مطابقت دارد. با فاصله گرفتن از دره، تاثیرگذاری شاخص فاصله عمودی تا شبکه کانال (VDCN) معکوس می‌شود؛ به عبارت دیگر، بیشتر چشمه‌ها در نزدیکی دره ظهور یافته‌اند. نواحی با بارش بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال، مستعدترین بخش حوضه بوده است، که با نتایج پژوهش آوند و همکاران (۲۰۲۰) مبنی بر تاثیر بسیار زیاد بارش در تغذیه آب زیرزمینی در منطقه یاسوج-دنا نیز مطابقت دارد. مقادیر مثبت شاخص موقعیت توپوگرافی، نشان دهنده نقاطی است که بالاتر از میانگین اطراف نقطه مورد نظر قرار گرفته‌اند (مانند خط الراس) و مقادیر منفی عکس این حالت را نشان می‌دهد (یعنی دره‌ها و چاله‌ها) نقاط صفر یا نزدیک صفر نیز نشان دهنده نواحی مسطح است؛ بنابراین، نمودار پاسخ موقعیت توپوگرافی (TPI) نشان می‌دهد که با افزایش برآمدگی سطح حوضه و ایجاد دامنه، نواحی مستعد حضور چشمه کم می‌شود. پاسخ شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، مثبت و نسبتاً یکنواخت است. نمودار پاسخ تراکم آبراهه دو شکستگی قابل توجه دارد؛ به این صورت که ابتدا در تراکم آبراهه  $0/5 \text{ (km/km}^2\text{)}$  به شدت

کاهش یافته و در تراکم ۱ تا  $۱/۳$  ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) به شدت افزایش می‌یابد، سپس دوباره کاهش می‌یابد. افزایش تراکم آبراهه در بخشی از حوضه تاثیر مثبت قابل توجهی بر حضور چشمه داشته است؛ این در حالی است که انتظار می‌رود با افزایش تراکم آبراهه، نفوذپذیری نیز کمتر شود و در نتیجه تعداد حضور چشمه نیز کاهش یابد، زیرا الگو و تراکم شبکه زهکشی توسط سنگ‌های بستر تعیین می‌گردد و تراکم زهکشی رابطه معکوسی با میزان نفوذپذیری دارد. شاید دلیل این حالت را بتوان تعداد زیاد چشمه و در نتیجه تراکم زیاد آبراهه دانست؛ به عبارت دیگر، وجود چشمه باعث ایجاد آبراهه گردیده است؛ بنابراین، وجود آبراهه در هر نقطه از حوضه، بیانگر وجود جریان سطحی دائم یا موقت و به طور کلی تخلیه سطحی جریان آب است. بنابراین تراکم زیادتر آبراهه، نشان دهنده نفوذپذیری کمتر و رواناب بیشتر است که از تراکم زیاد چشمه ایجاد شده است؛ بیشتر آبراهه‌های حوضه مورد مطالعه نیز از چشمه‌های بالادست منشا می‌شوند.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) پاسخ یکنواخت و ناچیزی بر مدلسازی داشته است؛ این در حالی است که در بسیاری از مطالعات، این شاخص یکی از موثرترین شاخص‌های موثر بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی بوده است (برای نمونه، تیموری و اسدی نلیوان، ۱۳۹۹؛ اربولالاجی و همکاران، ۲۰۱۹)؛ می‌توان دلیل تاثیر ناچیز شاخص رطوبت توپوگرافی در این پژوهش را در کارستی بودن حوضه مورد مطالعه و تاثیرپذیری کم پیدایش چشمه‌ها از عوارض سطحی دانست.

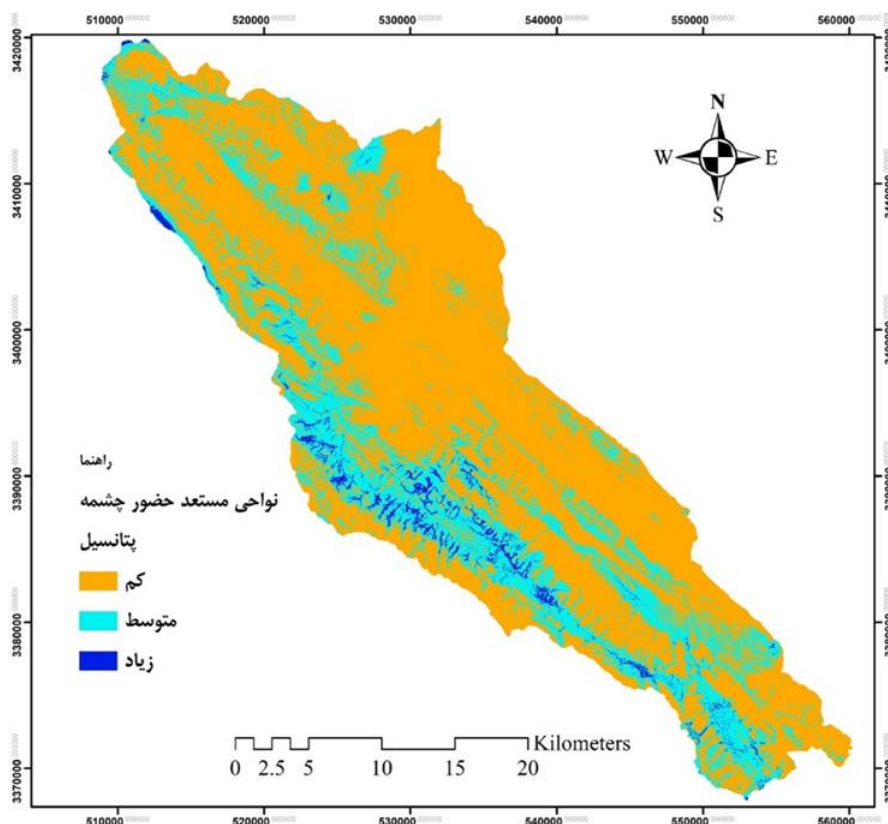
تقعر و تحدب شیب در ضریب رواناب و نفوذپذیری نقش مهمی دارند. گرادیان هیدرولیکی، جهت حرکت آب زیرزمینی و محل تشکیل آبخوان نیز هر عوامل وابسته به ارتفاع و شیب است. البته باید توجه داشت که انطباق تقریبی طبقات ارتفاعی و شیب با یکدیگر باعث می‌شود که سیستم جریان آب زیرزمینی در اغلب موارد متأثر از شیب باشد بدیهی است که شیب زیاد موجب افزایش سرعت رواناب و به تبع آن کاهش نفوذ می‌شود و شیب کم باعث کاهش سرعت رواناب سطحی و افزایش نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی می‌گردد، به طوری که با گذر از شیب ۳۰ درصد، نواحی مستعد به شدت کم می‌شود که با یافته‌های محمدنژاد و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد. این حالت برای شاخص زبری توپوگرافی نیز به دلیل تاثیرپذیری بسیار زیاد این شاخص از شیب منطقه صادق است. شاخص سطح واقعی (RSA) تاثیر مثبت و ثابتی داشته است. با افزایش قدرت جریان (SPI) استعداد منطقه برای حضور چشمه کمتر شده است. اثرگذاری سنگ‌شناسی حوضه در محدوده دو سازند آسماری و گچساران به دلیل کارستی بودن و سطح رخنمون قابل توجه در حوضه، مثبت بوده است و برای سایر سازندها به ویژه گورپی و پایده به دلیل ریزدانه بودن، پاسخ منفی داشته است. تراکم خطواره با فراز و فرود مثبت، پاسخ داده است. تراکم گسل بیش از  $۰/۶$  ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) به شدت تاثیرگذار بوده است. با مثبت شدن مقدار شاخص انحناء، دامنه محدب می‌شود و شیب آن نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین این شاخص مانند شاخص شیب، تاثیر منفی بر حضور چشمه‌ها داشته است. پاسخ شاخص برآیند بردار، ثابت با تاثیر ناچیز بوده است.

به طور کلی، احتمالاً شکستگی‌های بوجود آمده در منحنی‌های پاسخ به دلیل تاثیرگذاری متقابل سایر متغیرها باشد؛ با این وجود، نقاط عطف این منحنی‌ها و محدوده میان این نقاط، موثرترین بخش شاخص است که مستعد بودن یا نبودن منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۷: منحنی پاسخ و اثرگذاری هر کدام از شاخص‌ها در مدل مورد استفاده شامل: (a جهت، b تراکم خطواره، c VDCN، d، TWI (e، TRI (f، TPI (g، تراکم آبراهه، h قدرت جریان، j شیب، k، سطح واقعی، l DEM، i انحناء دامنه، m تراکم گسل، n پوشش گیاهی، o VRM، p بارش، r زمین‌شناسی

شکل ۸ نقشه نواحی مستعد حضور چشمه در حوزه آبخیز کبگیان را بر مبنای الگوریتم آنتروپی بیشینه شانون نشان می‌دهد. طبق این نقشه، نواحی با پتانسیل زیاد، متوسط و کم حضور چشمه به ترتیب، ۱۸۹۴، ۲۱۷۹۵ و ۶۳۶۳۷ هکتار است. بنابراین، بخش اعظم حوزه توان منابع آب کمی دارد. نواحی با پتانسیل زیاد نیز عمدتاً در ارتفاعات سازندهای آسماری و گچساران قرار گرفته است؛ این حالت نشان از کارستی بودن حوزه دارد؛ چراکه منابع آب کارست در ارتفاعات میانی و دامنه‌ها قرار دارد (کریمی وردنجانی، ۱۳۹۴).



شکل ۸: نقشه نواحی مستعد حضور چشمه در حوزه آبخیز کبگیان

### نتیجه‌گیری

وجود ارزش اقتصادی چشم‌اندازهای کارستی به دلیل تخلخل قابل توجه زیرسطحی (۱۰ تا ۳۰ درصد)، اساساً به منابع آب فراوان آن مربوط می‌شود. آبخوان‌های کارستی از عهد باستان مورد استفاده قرار می‌گرفته و رشد و توسعه بسیاری از شهرهای مهم را فراهم کرده‌اند. امروزه، نیاز فراوان به آب و خطر آلودگی آن، درک و شناخت بهتر آبخوان‌های کارستی و پتانسیل‌یابی آن به منظور مدیریت دقیق منابع آب را اجتناب‌ناپذیر کرده است. از این رو، هدف این پژوهش، تعیین نواحی مستعد حضور چشمه و در نتیجه پتانسیل‌یابی منابع آب کارستی در حوزه آبخیز کبگیان و نیز ارزیابی قابلیت الگوریتم آنتروپی بیشینه‌شانون در این رابطه بوده است. بدین منظور، از ۱۷ لایه اطلاعاتی محیطی شامل جهت دامنه، تراکم خطواره، فاصله عمودی تا شبکه کانال، رطوبت توپوگرافی، زبری توپوگرافی، موقعیت توپوگرافی، تراکم آبراهه، قدرت جریان، شیب دامنه، سطح واقعی، مدل رقومی ارتفاع، انحناء دامنه، تراکم گسل، پوشش گیاهی، زبری توپوگرافی، بارش، سنگ‌شناسی استفاده شد که موثرترین آنها در تهیه نقشه پتانسیل منابع آب حوضه، مدل رقومی ارتفاع بود. با این وجود، هیچکدام از شاخص‌ها توانایی پیش‌بینی قابل قبول را به تنهایی نداشتند؛ شاید بتوان این حالت را به پیچیدگی سیستم‌های کارست و دشواری مداسازی آن نسبت داد. دقت مدل (۸۲/۷ درصد) و همچنین صحت‌سنجی نتایج به دست آمده در منطقه مورد مطالعه و نیز مطابقت چشمه‌ها با نقشه‌سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه حاکی از قابلیت خیلی خوب مدل در رسیدن به هدف پژوهش است. نقشه نهایی نواحی مستعد حضور چشمه به سه طبقه زیاد، متوسط و کم تقسیم شده است که به ترتیب، ۲/۲، ۲۵ و ۷۲/۸ درصد از حوضه را شامل می‌شود. نواحی با پتانسیل آب بالا در سازندهای کارستی و عمدتاً در ارتفاعات قرار دارد. نرم افزار مکسنت برای پیش‌بینی مناسب‌ترین نواحی حضور یک متغیر وابسته بر مبنای آنتروپی بیشینه‌شانون، فقط به اطلاعات حضور آن متغیر و لایه‌های اطلاعاتی متغیرهای مستقل محیطی نیازمند است؛ از این رو، مزیت اصلی این مدل، طبقه‌بندی دقیق پتانسیل با استفاده از لایه‌های حضور متغیر وابسته است؛ بنابراین، در استفاده از این مدل،



خطای احتمالی حاصل از نقاط نبود یا عدم حضور، رخ نمی‌دهد. به طور کلی، این مدل توانایی قابل توجهی در تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی دارد و می‌توان از آن در پیش‌بینی و تهیه نقشه‌های پتانسیل منابع آب کارستی حوزه‌های آبخیز نیز استفاده کرد.

برای تکمیل این پژوهش و ترسیم تحقیقات آینده در حوضه کبگیان، می‌توان پیشنهادات اجرایی و مدیریتی ذیل را ارائه کرد:

- استفاده از دیگر روش‌های آماری و یادگیری ماشین به منظور تعیین مقایسه دقت پیش‌بینی مناطق مستعد حضور چشمه به منظور کاهش هدررفت زمان و هزینه
- اولویت‌بندی مناطق دارای چشمه‌های با دبی بیشتر جهت مصارف شرب، کشاورزی و غیره
- استفاده از چشمه‌اندازهای مربوط به این چشمه‌ها برای جذب توریست و گردشگر
- بهینه‌سازی فعالیت و افزایش درآمد ساکنین
- مدیریت برداشت از منابع آب زیرزمینی به منظور ایجاد تعادل در این منابع مهم و حیاتی

#### منابع

- افراسیابیان، ا.، ۱۳۷۷. اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست ایران. مجموعه مقالات دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی.
- اکبری، ا. و ارشادی مقدم، علیرضا، ۱۳۹۴. بررسی ارتباط پراکنش چشمه‌ها با گسل‌ها از طریق GIS در ارتفاعات شمالی و جنوبی دشت سبزووار، اولین همایش ملی آب، انسان، زمین، اصفهان.
- آوند، م.ت.، جانی‌زاده، س. و فرزین، م.، ۱۳۹۸. تعیین پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های داده کاوی و آماری در منطقه یاسوج-سی سخت، مرتع و آبخیزداری، دوره ۷۲، شماره ۳، صص ۶۲۳-۶۰۹.
- بهرامی، ش.، زنگنه اسدی، م.ع. و جهانفر، ع.، ۱۳۹۵. ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در زاگرس، جغرافیا و توسعه، ۴۴، صص ۱۴۴-۱۰۷.
- بیابانی، ل.، ملکیان، آ. و اکبرپور بناب، ب.، ۱۳۹۹. ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز صوفی چای با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۲۲، سال ششم، صص ۶۵-۴۳.
- تیموری، م. و اسدی نلیوان، ا.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی حساسیت و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه‌ی موردی: استان لرستان)، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۲۱، سال ششم، صص ۱۷۹-۱۵۵.
- تیموری، م. و اسدی نلیوان، ا.، ۱۳۹۹. مهمترین عامل‌های مؤثر بر توان آب زیرزمینی در آبخیز پیرانشهر (آذربایجان غربی) با مدل MaxEnt و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، پژوهش‌های آبخیزداری، دوره ۳۳، شماره ۱، صص ۷۱-۵۶.
- رحمتی، ا.، طهماسبی‌پور، ن.، حقی‌زاده، ع.، پورقاسمی، ح.ر. و فیضی‌زاده، ب.، ۱۳۹۷. ارزیابی کارایی مدل یشینه آنتروپی در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آب‌کندی حوزه آبخیز کشکان-پلدختر، مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۱۰، شماره ۴، صص ۷۳۸-۷۲۷.
- رضوی ترمه، س.و.، سعدی مسگری، م. و کاظمی، ک.، ۱۳۹۶. ارزیابی و مقایسه روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، اکوهیدرولوژی، دوره ۴، شماره ۳، صص ۷۳۶-۷۲۵.

- زندی، س.، سلیمانی، ک. و زندی، ج.، ۱۳۹۴. تهیه نقشه نواحی با پتانسیل وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی با استفاده از روش آماری رگرسیون لجستیک در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کوهستانی میرده، کردستان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز (علمی-پژوهشی)، ۶(۱۲)، صص ۷۵-۸۷.
- عباسی، ث. و حیدری، م.، ۱۳۹۵. ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های AHP و منطق فازی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی شمالی استان ایلام)، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۶، صص ۹۳-۷۵.
- عباسی، م.، باقری سید شاکری، س. و جعفری اقدام، م.، ۱۳۹۳. پهنه بندی تحول کارست با استفاده از مدل آنتروپی نمونه موردی: تاقدیس نوا، زاگرس شمال باختری، نشریه علوم زمین، ۲۴(۹۴)، صص ۱۶۸-۱۶۱.
- فرزین، م.، نظری سامانی، ا.، منبری، س.، فیض‌نیا، س. و کاظمی، غ.ع.، ۱۳۹۹. بررسی وضعیت خطوارگی سازندهای کارستی حوزه‌های آبخیز مشرف به خلیج فارس، مرتع و آبخیزداری، دوره ۷۳، شماره ۱، صص ۱۸۱-۱۶۷.
- قربانی، م.ص.، ۱۳۹۴. چشم‌انداز کارست به مثابه شاخص استقرار در منطقه کامیاران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷(۴)، صص ۵۳۱-۵۱۷.
- کریمی وردجانی، ح.، ۱۳۹۴. هیدروژئولوژی و ژئومورفولوژی کارست، انتشارات ارم شیراز، ۵۳۶ صفحه.
- محمدنژاد، و.، اصغری، ص. و گل‌محمدزاده، ب.، ۱۳۹۲. تهیه نقشه مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی با استفاده از GIS و MIF، مطالعه موردی: شهرستان ارومیه، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲(۳)، صص ۵۸-۴۵.
- ملکی، ا. و اویسی، م.، ۱۳۹۱. شناسایی ساختار گسلی و تحول چشمه‌های کارستی با استفاده از رادار نفوذی (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)، مجله جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۳، صص ۱۰-۱.
- نظری سامانی، ع.ا.، اولیایی، ع. و فیض‌نیا، س.، ۱۳۹۶. پهنه‌بندی و ارزیابی فراوانی چشمه‌ها در مناطق کارستی با استفاده از رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بجنورد)، مرتع و آبخیزداری، دوره ۷۰، شماره ۳، صص ۸۰۳-۷۹۱.
- نظری سامانی، ع.ا.، صمدی، م. و ملکیان، آ.، ۱۳۹۸. تعیین مهمترین عوامل مؤثر بر آبدهی چشمه‌های کارستیک در منطقه البرز میانی، مرتع و آبخیزداری، دوره ۷۲، شماره ۳، صص ۸۶۳-۸۵۳.
- یمانی، م. و علی‌زاده، ش.، ۱۳۹۳. پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP (مطالعه موردی: حوضه آبد-اقلید فارس)، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱، صص ۱۴۴-۱۳۱.
- Amiri, V., Kamrani, S., Ahmad, A., Bhattacharya, P., & Mansoori, J., 2020. Groundwater quality evaluation using Shannon information theory and human health risk assessment in Yazd province, central plateau of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-23.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D. & Sreelash, K., 2019. GIS and AHP techniques Based Delineation of Groundwater potential Zones: a case study from the southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9, 2082, pp. 1-17.
- Avand, M. & Ekhtesasi, M. R., 2020. The effect of geological formations on the quality and quantity of groundwater (case study: Imamzadeh Jafar Gachsaran plain). *Sustainable Earth Review*, 1(1), pp.1-6
- Avand, M., Janizadeh, S., Tien Bui, D., Pham, V. H., Ngo, P. T. T., & Nhu, V. H., 2020. A tree-based intelligence ensemble approach for spatial prediction of potential groundwater. *International Journal of Digital Earth*, pp. 1-22.
- Byeon, D., Jung, S. & Lee, W.S., 2018. Review of CLIMEX and MaxEnt for studying species distribution in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 11, pp. 325-333.



- Corsini, A., Cervi, F., & Ronchetti, F. 2009. *Weight of evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy)*. *Geomorphology*, 111(1-2), 79-87.
- Davis, A.D., Long, A.J. & Wireman, M., 2002. *KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain*. *Environmental Geology*, 42, pp. 65–72.
- Ford, D. & Williams, P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons press, Chichester, West Sussex, England.
- Franklin, J., 2010. *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge University Press.
- Glen, J.M.G., Egger, A.E., Ippolito, C. & Athens, N., 2013. *Correlation of Geothermal springs sub-surface fault terminations Revealed by High Resolution UAV- Acquired Magnetic data. Thirty- Eighth work shop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford university, Stanford, California, February*.
- Lee, D.K. & Kim, H.G., 2010. *Habitat potential evaluation using MaxEnt model-focused on riparian distance, stream order and land use*. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 13, pp. 161-172.
- Naghibi, S. A., Moghaddam, D. D., Kalantar, B., Pradhan, B. & Kisi, O., 2017. *A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping*. *Journal of Hydrology*, 548, 471-483.
- Nguyen, P. T., Ha, D. H., Avand, M., Jaafari, A., Nguyen, H. D., Al-Ansari, N., ... & Ho, L. S., 2020. *Soft Computing Ensemble Models Based on Logistic Regression for Groundwater Potential Mapping*. *Applied Sciences*, 10(7), 2469.
- Nhu, V. H., Rahmati, O., Falah, F., Shojaei, S., Al-Ansari, N., Shahabi, H., ... & Ahmad, B. B., 2020. *Mapping of Groundwater Spring Potential in Karst Aquifer System Using Novel Ensemble Bivariate and Multivariate Models*. *Water*, 12(4), 985.
- Pham, B. T., Jaafari, A., Prakash, I., Singh, S. K., Quoc, N. K., & Bui, D. T., 2019. *Hybrid computational intelligence models for groundwater potential mapping*. *Catena*, 182, 104101.
- Phillips, S.J. & Dudik, M., 2008. *Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation*. *Ecography*, 31, pp. 161-175.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E., 2006. *Maximum entropy modeling of species geographic distributions*. *Ecological Modelling*, 190, pp. 231-259.
- Raeisi, E., 2002. *Carbonate karst caves in Iran*. In: Kranjc A (ed) *Evolution of karst: from prekarst to cessation*, Ljubljana-Postojna: pp. 339–344.
- Shannon, C.E., 1948. *A mathematical theory of communication*. *Bulletin System Technology Journal*, 27, pp. 379-423.
- Verbyla, D.L. & Litvaitis, J.A., 1989. *Resampling methods for evaluation of classificatioaccuracy of wildlife habitat models*, *Environmental Management*, 13, pp. 783-787.
- Yariyan, P., Avand, M., Abbaspour, R. A., Karami, M. & Tiefenbacher, J. P., 2020. *GIS-based spatial modeling of snow avalanches using four novel ensemble models*. *Science of The Total Environment*, 745, 141008.
- Yousefi, S., Avand, M., Yariyan, P., Pourghasemi, H. R., Keesstra, S., Tavangar, S. & Tabibian, S., 2020. *A novel GIS-based ensemble technique for rangeland downward trend mapping as an ecological indicator change*. *Ecological Indicators*, 117, 106591.