

تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی در دشت بجنورد

محسن ذبیحی^۱، حمیدرضا پورقاسمی^{۲*}، مرتضی بهزادفر^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد

۲. استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۳. دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان خراسان شمالی

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۲ - تاریخ تصویب: ۹۴/۰۶/۲۲)

چکیده

امروزه تأمین آب به‌منظور تحقق اهداف توسعه پایدار یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها و چالش‌ها در اکثر کشورهای جهان است. به‌همین دلیل، تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، از ابزارهای مهم در حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب به‌شمار می‌رود. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی در دشت بجنورد برنامه‌ریزی شده است. بدین منظور لایه‌های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طول شیب، طبقه ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی به‌عنوان عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی شناسایی و در نرم‌افزار ArcGIS رقومی و تهیه شد. سپس با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی، وزن هر یک از عوامل مؤثر در نرم‌افزار آماری R محاسبه و در نهایت نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی برای منطقه تحقیق تهیه شد. نتایج ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC)، بیانگر دقت خیلی خوب مدل انتروپی شانون (۸۵/۵۵ درصد) در مقایسه با مدل جنگل تصادفی (۷۶/۹۵ درصد) است. همچنین براساس مدل انتروپی شانون لایه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از آبراهه و طبقه ارتفاعی بیشترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آب زیرزمینی، چشمه، دشت بجنورد، مدل انتروپی شانون، مدل جنگل تصادفی.

مقدمه

امروزه تأمین آب در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها و چالش‌ها در اکثر کشورهای جهان به‌ویژه در منطقه خاورمیانه است. وضعیت منابع آبی در کشور ایران به‌گونه‌ای است که با وجود حدوداً ۱ درصد از جمعیت جهان، سهم کشور از کل منابع آب شیرین تجدیدشونده، تنها ۰/۳۶ درصد است [۶]؛ این در حالی است که منابع آب زیرزمینی در کشور در حدود ۷۷/۸ درصد مصارف شرب، صنعت و کشاورزی را تأمین می‌کنند [۵]. آب زیرزمینی به‌دلیل خصوصیات متنوع از قبیل دمای ثابت، ارزش توسعه‌ای کم، دسترسی گسترده و تأثیرپذیری کم از خشکسالی از مهم‌ترین منابع طبیعی به‌شمار می‌رود [۲۰]. آب زیرزمینی به‌عنوان آب موجود در منطقه اشباع توصیف می‌شود که تمام خلل و فرج خاک و سازندهای زمین‌شناسی پایین‌تر از سطح را پر می‌کند [۱۴]. وجود آب زیرزمینی در هر نقطه از کره خاکی، نتیجه برهمکنش بین عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، فیزیوگرافی و اکولوژیکی است [۲۶]. حرکت آب زیرزمینی تحت تأثیر فاکتورهای متعددی از جمله توپوگرافی، سنگ‌شناسی، ساختار زمین‌شناسی، شکاف‌ها (تراکم، اندازه و ارتباط)، تخلخل ثانویه، تغذیه آب زیرزمینی، الگوی زهکشی، شکل زمین، پوشش زمین و شرایط اقلیمی است [۳۵، ۳۴، ۲۹، ۲۳]. بی‌گمان با در نظر گرفتن عوامل مؤثر می‌توان به تهیه نقشه‌ها و پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مختلف در هر منطقه به‌منظور مدیریت صحیح این منابع با ارزش پرداخت. وقوع خشکسالی‌های متناوب و طولانی و نوسان زیاد آب‌وهوا از عوامل اصلی کمبود آب به‌ویژه منابع آب سطحی است که فشار مضاعفی را بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کند. بر این اساس اجرای پژوهش‌های بیشتر در زمینه پتانسیل‌یابی، اکتشاف و بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی، ضروری به‌نظر می‌رسد. روش‌های معمول مورد استفاده برای تهیه مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی اصولاً براساس مطالعات و بازدیدهای صحرائی است [۱۵]، اما تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در هر واحد زمین‌شناسی با به‌کارگیری تکنیک‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، روشی سودمند در سطح جهان شناخته شده است [۱۹]. روش‌های متعددی در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده شده‌اند که می‌توان

مدل‌های نسبت فراوانی^۱، وزن واقعه^۲، رگرسیون لجستیک^۳ و انتروپی شانون^۴ را ذکر کرد [۳۴، ۳۰، ۲۹، ۲۶، ۲۲، ۱۳]. در همین راستا محققان بسیاری به تهیه و ارزیابی نقشه‌های مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی به روش‌های مختلف از جمله منطق فازی و بولین پرداخته‌اند [۳۸، ۳۷، ۲۴، ۲۱، ۱۷، ۱۶، ۱۲]. برخی از محققان نیز ارزیابی مدل‌های احتمالاتی را مدنظر قرار داده‌اند [۲۵، ۱۸، ۱۱، ۹، ۸]. در این راستا پورتقی و پورقاسمی [۳۴] به ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از نقاط چشمه در شهرستان بیرجند پرداختند. بدین منظور ایشان از روش‌های نسبت فراوانی، وزن واقعه و رگرسیون لجستیک در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند و نشان دادند که روش نسبت فراوانی با مقدار سطح زیر منحنی (AUC)^۵ برابر ۷۵/۶۹ درصد بهترین عملکرد را داشته است. نقیعی و همکاران [۲۶] از مدل نسبت فراوانی و انتروپی شانون به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه آبخیز مغان خراسان رضوی استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که مدل انتروپی شانون با سطح زیر منحنی برابر با ۹۱/۲۱ درصد کارایی بسیار مناسبی داشته است.

با توجه به اینکه اجرای آزمایش‌های اکتشافی منابع آب زیرزمینی نیازمند صرف زمان و هزینه بسیار زیادی است، استفاده از تکنیک‌های جدید از جمله سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در این زمینه ضروری به‌نظر می‌رسد. نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده مدیران و برنامه‌ریزان به‌منظور سیاستگذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های خرد و کلان کشورها قرار گیرد. بر این اساس، تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی یکی از ابزارهای مهم در حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب است [۱۳]. نظر به اهمیت موضوع و همچنین خشکسالی‌های به‌وقوع پیوسته در دشت بجنورد [۳]، شناسایی منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح این منابع به‌عنوان راهکار توسعه جامع و پایدار امری حائز اهمیت است. بنابراین در پژوهش حاضر سعی بر آن است که با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی^۶

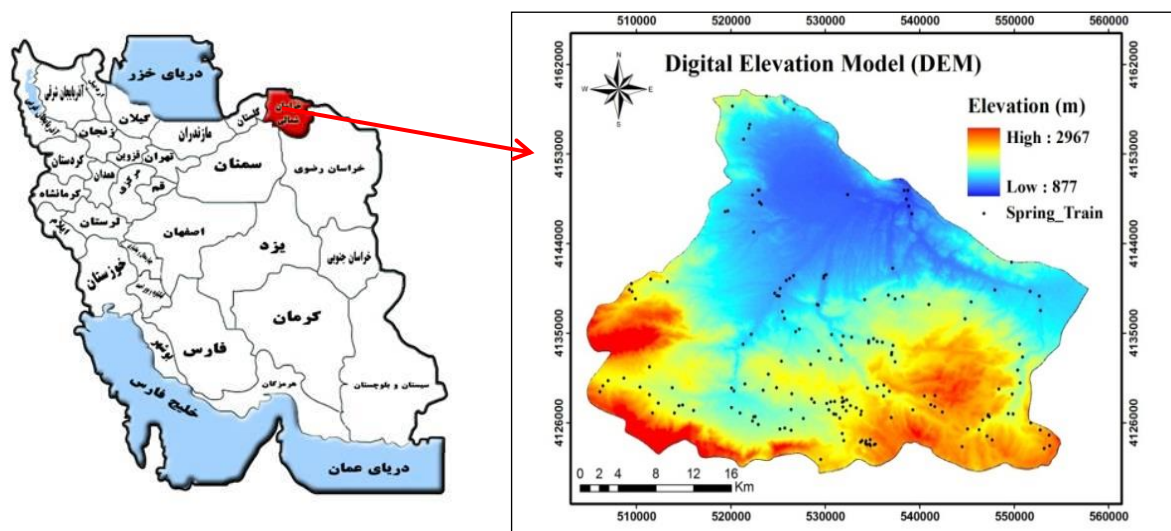
1. Frequency Ratio
2. Weights-of-Evidence
3. Logistic Regression
4. Shannon's Entropy
5. Area Under the Curve
6. Random Forest

متر از سطح دریاست. همچنین میانگین بلندمدت بارندگی در شهرستان نیز ۲۶۶/۴ میلی‌متر گزارش شده است. براساس گزارش‌های سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی، در منطقه مطالعاتی ۶۹۵ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق، ۲۱ رشته قنات و ۲۳۴ دهانه چشمه وجود دارد. بنابر آخرین آماربرداری در دشت بجنورد طی سال ۱۳۸۱، مجموع برداشت از منابع آب زیرزمینی ۱۰۱/۸۶ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. در این بین، بیشترین بهره‌برداری با ۶۴/۶۵ درصد مربوط به چشمه‌ها و کمترین آن با ۴/۳۸ درصد مربوط به قنات است. همچنین بیشترین مصرف آب استحصال از چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات مربوط به بخش کشاورزی است. منطقه مطالعاتی دارای شیبی ملایم از جنوب به طرف شمال است که در قسمت جنوب به کوهستان منتهی می‌شود. در شکل ۱ موقعیت منطقه تحقیق در کشور و استان ارائه شده است.

ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمینی با هریک از عوامل مؤثر بر آن، به‌دست آید و در نهایت نقشه پتانسیل آب زیرزمینی دشت بجنورد بر اساس اطلاعات چشمه‌های موجود در منطقه تهیه شود. ارزیابی صحت مدل‌های استفاده‌شده و نیز مقایسه آنها از دیگر هدف‌های پژوهش حاضر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی، بخش جنوبی شهرستان بجنورد در مرکز استان خراسان شمالی با مساحتی حدود ۱۲۴۳ کیلومترمربع است که از لحاظ جغرافیایی بین مختصات ۵۶ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته و بر اساس دسته‌بندی حوضه‌های آبخیز توسط جاماب، موسوم به دشت بجنورد است. کمینه و بیشینه ارتفاع در منطقه تحقیق به ترتیب ۸۷۷ و ۲۹۶۷



شکل ۱. موقعیت چشمه‌های استفاده‌شده در پژوهش به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در استان خراسان شمالی و کشور

جهان و ایران [۲۲، ۲۶، ۳۰، ۳۴] به‌عنوان عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی از روی نقشه‌های پایه (توپوگرافی، زمین‌شناسی و ...) موجود با استفاده از الحاقیه‌های مختلف در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی رقومی و تهیه شد. به این منظور با استفاده از نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه مدل رقومی ارتفاع تهیه و عوامل درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طبقه ارتفاعی و شاخص رطوبت توپوگرافی از آن استخراج شد. لایه اطلاعاتی کاربری

روش کار

به‌منظور اجرای پژوهش حاضر، نخست نقشه‌های پایه (نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی) از سازمان‌ها و ادارات ذی‌ربط اخذ شد. لایه‌های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طول شیب (رابطه ۱)، طبقه ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی (رابطه ۲)، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی با توجه به سابقه پژوهش صورت‌گرفته در

ترسیم نقشه با استفاده از مدل انتروپی شانون از رابطه‌های ۳ تا ۷ استفاده شد [۳۲، ۱۰، ۷].

$$(P_{ij}) = P_{ij} / \sum_{j=1}^{S_j} P_{ij} \quad (3)$$

$$H_j = \sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$H_{j \max} = \log_2 S_j, S_j - \text{Number of Class} \quad (5)$$

$$I_j = (H_{j \max} - H_j) / H_{j \max}, I = (0, 1), j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad (7)$$

که در آن P_{ij} تراکم چشمه در هر طبقه، (P_{ij}) احتمال وجود چشمه در هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن، H_j و $H_{j \max}$ مقادیر انتروپی و ماکزیمم انتروپی، I_j ضریب اطلاعات و W_j وزن نهایی هر عامل است. بعد از تعیین وزن نهایی هر عامل و ضرب آن در کلاس‌های عامل مذکور یعنی مقدارهای P_{ij} مربوط به هر عامل و کلاس‌های آن براساس تقسیم تعداد چشمه بر تعداد پیکسل‌های کلاس‌های عوامل (جدول ۱)، نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شد. طبقه‌هایی که حساسیت بیشتری دارند، وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهند [۳۲، ۲۶، ۱۰].

مدل جنگل تصادفی

این الگوریتم را نخستین بار لئو برایمن و آدل کاتلر ایجاد کردند و توسعه دادند. الگوریتم جنگل تصادفی مبتنی بر دسته‌ای از درخت‌های تصمیم است و در حال حاضر یکی از بهترین الگوریتم‌های یادگیری است. مدل پیش‌بینی‌کننده RF براساس میانگین‌گیری از نتایج حاصل از تمامی درخت‌های تصمیم مربوط استوار است و برای بسیاری از مجموعه داده‌ها، طبقه‌بندی با صحت بالایی را انجام می‌دهد [۴، ۱]. درختان تصادفی با در نظر گرفتن بردار ورودی، آن را با هر درخت در جنگل طبقه‌بندی کرده و خروجی، برچسب‌های کلاسی هستند که از اکثریت آرا دریافت شده است. در این مدل از دو عامل میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهشی جینی برای تعیین اولویت تأثیر هر یک از عوامل مؤثر استفاده می‌شود. بر اساس اظهار نظر نیکودموس [۲۸]، استفاده از میانگین کاهشی دقت در مقایسه با شاخص اهمیت جینی در تعیین اولویت عوامل مؤثر، بهتر و پایدارتر است، به‌ویژه در شرایطی که

اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان شمالی اخذ شد. نقشه زمین‌شناسی منطقه تحقیق نیز از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه، در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 رقومی و لایه‌های زمین‌شناسی، فاصله از گسل و تراکم گسل از آن استخراج شد. لایه‌های مربوط به آبراهه نیز از نقشه توپوگرافی منطقه تحقیق تهیه شد. به‌منظور شناسایی چشمه‌های موجود در منطقه علاوه بر اجرای مطالعات گسترده صحرایی در منطقه تحقیق، به سازمان تحقیقات منابع آب ایران (تماب) مراجعه و اطلاعات موقعیت جغرافیایی چشمه‌ها در دشت بجنورد برای تهیه نقشه‌ها و اجرای تحلیل‌ها نیز استفاده شد. پس از تعیین عوامل و نقشه‌های یادشده و تهیه بانک اطلاعاتی و براساس مرور منابع اقدام به تهیه نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی براساس داده‌های چشمه و با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی در محیط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS، SAGA-GIS) و همچنین نرم‌افزار آماری R شد. در پژوهش حاضر به‌منظور مدلسازی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی از نرم‌افزار R و بسته random Forest استفاده شد.

$$LS = \left(\frac{A}{22/13} \right)^{1/6} \left(\frac{\sin \alpha}{0.0896} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$TWI = \ln(A / \tan \alpha) \quad (2)$$

که در آن: LS عامل طول شیب، TWI عامل رطوبت توپوگرافی، A مساحت حوضه آبخیز و α گرادین شیب بر حسب درجه است [۳۲، ۲۶].

مدل انتروپی شانون

در اصل استفان بولتزمن که نخستین گام برای توسعه تئوری انتروپی شانون بود، رابطه‌ای یک به یک بین مقدار انتروپی سیستم و درجه آشفتگی وجود دارد و به‌طور معمول برای بیان وضعیت ترمودینامیکی سیستم استفاده می‌شود [۲۶]. تئوری انتروپی را نخستین بار شانون به‌صورت کمی بیان کرد [۳۹]. انتروپی، یکی از رویکردهای مدیریتی است که به‌منظور برخورد با بی‌نظمی، بی‌ثباتی و عدم یقین‌های موجود در یک سیستم استفاده می‌شود [۳۲]. در انتروپی، متغیرهایی با حداکثر تأثیر در وقوع یک رخداد، تعیین و مشخص می‌شوند. به‌منظور پهنه‌بندی و

مؤثر و حد اثر هر یک از آنها با استفاده از مدل انتروپی شانون در جدول ۱ ارائه شده است.

براساس نتایج به دست آمده، طبقه ارتفاعی متوسط (۱۵۷۵ تا ۱۸۸۱ متر) بیشترین تعداد چشمه را در خود جای داده است و دو طبقه پایین تر تفاوت چندانی از لحاظ تعداد چشمه با یکدیگر ندارند که این امر احتمالاً به دلیل کم بودن تراکم زهکشی در این طبقه و در نتیجه نفوذ بیشتر و امکان ورود آب زیرزمینی از طریق درز و شکاف‌ها به سطح در طبقه ارتفاعی متوسط است. براساس نتایج ارائه شده در جدول ۱، بیشترین تعداد چشمه‌ها در کلاس جهت شیب جنوب است که این امر نشان دهنده زیاد بودن پتانسیل آب زیرزمینی در جهت مذکور است و کمترین آن در مناطق مسطح رخ داده است. شاید دلیل آن وجود گسل‌های منطقه تحقیق باشد که در جهت‌های جنوبی متمرکز شده‌اند و به نحوی در ایجاد درزه و چشمه مؤثرند. نتایج همچنین نشان داد که فاصله صفر تا ۲۰۰ متری از آبراهه نیز بیشترین تعداد چشمه را در خود جای داده است.

بین فاکتورهای محیطی ارتباط وجود دارد. به همین دلیل در پژوهش حاضر از میانگین کاهشی دقت در تعیین اولویت عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شد.

ارزیابی مدل‌های تهیه نقشه آب زیرزمینی

به منظور ارزیابی مدل‌های تهیه شده، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC)^۱ استفاده شد [۳۶، ۳۳، ۳۱، ۲۷، ۲]. منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست. سطح زیر منحنی ROC، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وجود چشمه) و عدم وقوع رخداد آن (نبود چشمه) است. ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. هر چه سطح زیر منحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده است [۲].

نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمینی، عوامل

جدول ۱. ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمینی، عوامل مؤثر و تعیین حد تأثیر آنها با استفاده از مدل انتروپی شانون در دشت بجنورد

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد چشمه	P_{ij}	(P_{ij})	(H_j)	$H_{j_{max}}$	I_j	W_{ij}
ارتفاع از سطح دریا (متر)	< ۱۲۹۳	۳۷۵۲۷۵	۳۴	۰/۷۱	۰/۱۶				
	۱۲۹۳ - ۱۵۷۵	۳۳۲۳۶۵	۳۹	۰/۹۲	۰/۲۱				
	۱۵۷۵ - ۱۸۸۱	۳۱۰۶۰۳	۵۹	۱/۴۹	۰/۳۴	۱/۹۴	۲/۳۲	۰/۱۶	۰/۱۴۳
	۱۸۸۱ - ۲۱۹۸	۲۷۲۷۰۴	۴۴	۱/۲۷	۰/۲۹				
	۲۱۹۸ - ۲۹۶۷	۹۰۷۸۹	۰	۰/۰۰	۰/۰۰				
جهت شیب	سطح (Flat)	۵۳۲۹	۰	۰/۰۰	۰/۰۰				
	شمال	۲۶۸۹۲۳	۲۲	۰/۶۴	۰/۰۸				
	شمال شرق	۲۱۴۰۷۱	۱۶	۰/۵۹	۰/۰۷				
	شرق	۱۷۱۴۸۳	۱۴	۰/۶۴	۰/۰۷				
	جنوب شرق	۱۴۹۶۶۹	۲۳	۱/۲۱	۰/۱۴	۲/۹۱	۳/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۷۷
	جنوب	۱۶۶۴۷۴	۳۴	۱/۶۰	۰/۱۹				
	جنوب غرب	۱۱۹۵۸۴	۲۰	۱/۳۱	۰/۱۵				
	غرب	۱۲۲۸۷۴	۱۹	۱/۲۱	۰/۱۴				
	شمال غرب	۱۶۳۳۲۹	۲۸	۱/۳۵	۰/۱۶				
درجه شیب	< ۵	۳۹۹۴۶۰	۴۷	۰/۶۷	۰/۱۷				
	۵-۱۵	۶۲۰۲۳۶	۹۹	۰/۹۱	۰/۲۴	۱/۸۷	۲/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۶۲
	۱۵-۳۰	۳۰۵۸۳۳	۹۰	۱/۶۸	۰/۴۳				
	> ۳۰	۵۶۲۰۷	۶	۰/۶۱	۰/۱۶				

ادامه جدول ۱. ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمینی، عوامل مؤثر و تعیین حد تأثیر آنها با استفاده از مدل انتروپی شانون در دشت بجنورد

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد چشمه	P_{ij}	(P_{ij})	H_{jmax}	I_j	W_{ij}
طول شیب	۰ - ۳/۳۲	۷۳۱۵۴۲	۸۸	۰/۹۴	۰/۲۴	۲/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۳
	۳/۳۲ - ۸/۳۹	۴۱۵۲۱۶	۶۰	۱/۱۳	۰/۲۹			
	۸/۳۹ - ۱۵/۹۱	۱۸۲۶۹۹	۲۲	۰/۹۵	۰/۲۴			
	> ۱۵/۹۱	۵۲۲۷۹	۶	۰/۹۰	۰/۲۳			
شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)	< ۱۰/۰۳	۶۸۲۰۲۲	۶۵	۰/۷۵	۰/۱۳	۲/۰۰	۰/۱۰	۰/۱۴۰
	۱۰/۰۳ - ۱۲/۴	۴۷۱۶۰۸	۶۸	۱/۱۳	۰/۲۰			
	۱۲-۴ - ۱۶/۱۳	۱۷۴۴۲۶	۲۴	۱/۰۸	۰/۱۹			
	۱۶/۱۳ - ۲۵/۶۵	۵۳۶۸۰	۱۹	۲/۷۸	۰/۴۸			
کاربری اراضی	جنگل	۷۱۵۵۰	۴	۰/۴۳	۰/۰۸	۲/۵۸	۰/۴۱	۰/۳۳۸
	مرتع	۵۱۵۸۶۷	۳۳	۰/۵۰	۰/۱۰			
	زراعت دیم	۶۰۲۳۳۷	۷۱	۰/۹۲	۰/۱۸			
	زراعت آبی	۱۷۳۳۷۴	۶۸	۳/۰۷	۰/۶۲			
	زمین‌های بایر	۲۶۳۵	۰	۰	۰			
	مناطق مسکونی	۱۵۹۷۳	۰	۰	۰			
انحنای آبراهه (100/m)	مقعر	۶۲۳۸۴۰	۶۴	۰/۸۱	۰/۳۲	۱/۵۸	۰/۰۷	۰/۰۶۰
	مسطح	۸۷۴۴۸	۵	۰/۴۵	۰/۱۸			
	محدب	۶۷۰۴۴۸	۱۰۷	۱/۲۵	۰/۵۰			
انحنای سطح (100/m)	مقعر	۵۹۰۷۲۸	۹۶	۱/۲۸	۰/۴۳	۱/۵۸	۰/۰۲	۰/۰۲۱
	مسطح	۱۶۸۵۲۷	۲۰	۰/۹۳	۰/۳۱			
	محدب	۶۲۲۴۸۱	۶۰	۰/۷۶	۰/۲۶			
لیتولوژی	Qft ₂	۱۱۸۲۷۹	۱۱	۰/۷۳	۰/۰۸	۲/۷۲	۰/۲۶	۰/۱۹۷
	Ktr	۳۷۵۵۹۲	۳۰	۰/۶۳	۰/۰۶			
	JKsj	۷۹۸۷۵	۲۹	۲/۸۵	۰/۲۹			
	Ksr	۷۱۷۴۱	۳	۰/۳۳	۰/۰۳			
	Ksn	۵۲۶	۰	۰/۰۰	۰/۰۰			
	Kat	۱۲۹۸۲	۰	۰/۰۰	۰/۰۰			
	Qft ₁	۱۱۱۶۱۹	۱۷	۱/۲۰	۰/۱۲			
	Mur	۱۶۰۰۹۵	۱۴	۰/۶۹	۰/۰۷			
	Jl	۴۳۲۵۶۸	۷۱	۱/۲۹	۰/۱۳			
	TRJs	۱۳۴۱۹	۰	۰/۰۰	۰/۰۰			
	DCKh	۳۹۹۵	۱	۱/۹۷	۰/۲۰			
	Jd	۱۸۸	۰	۰/۰۰	۰/۰۰			
Sn	۸۵۷	۰	۰/۰۰	۰/۰۰				
فاصله از آبراهه (متر)	۰ - ۲۰۰	۱۰۱۵۷۵۷	۱۶۴	۱/۲۷	۰/۶۸	۲/۳۲	۰/۴۷	۰/۱۷۷
	۲۰۰ - ۴۰۰	۳۴۲۱۳۸	۱۱	۰/۲۵	۰/۱۳			
	۴۰۰ - ۶۰۰	۲۲۱۷۱	۱	۰/۳۵	۰/۱۹			
	۶۰۰ - ۸۰۰	۱۵۷۷	۰	۰/۰۰	۰/۰۰			
> ۸۰۰	۹۳	۰	۰/۰۰	۰/۰۰				
تراکم زهکشی (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	< ۱/۸۱	۳۶۵۷۹۳	۵۲	۱/۱۲	۰/۳۱	۲/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲۸
	۱/۸۱ - ۲/۷۷	۵۹۴۱۱۵	۸۲	۱/۰۸	۰/۳۰			
	۲/۷۷ - ۴/۵۵	۳۲۵۷۵۰	۳۶	۰/۸۷	۰/۲۴			
	۴/۵۵ - ۷/۹۹	۹۶۰۷۸	۶	۰/۴۹	۰/۱۴			

ادامه جدول ۱. ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمینی، عوامل مؤثر و تعیین حد تأثیر آنها با استفاده از مدل انتروپی شانون در دشت بجنورد

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد چشمه	P_{ij}	(P_{ij})	H_{jmax}	I_j	W_{ij}
فاصله از گسل (کیلومتر)	$< 2/5$	۴۶۵۳۶۰	۷۶	۱/۲۸	۰/۲۸			
	$2/5 - 5/4$	۳۶۴۹۹۴	۳۷	۰/۸۰	۰/۱۸			
	$5/4 - 8/7$	۲۵۹۷۹۶	۳۷	۱/۱۲	۰/۲۵	۲/۳۲	۰/۰۳	۰/۰۲۶
	$8/7 - 12/5$	۱۶۶۳۳۰	۱۸	۰/۸۵	۰/۱۹			
تراکم گسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	$12/5 - 18/3$	۱۲۵۲۵۶	۸	۰/۵۰	۰/۱۱			
	$< 1/87$	۱۲۲۰۸۷۰	۱۴۹	۰/۹۶	۰/۲۰			
	$1/87 - 5/91$	۷۴۳۲۵	۱۸	۱/۹۰	۰/۴۱	۱/۸۸	۰/۰۶	۰/۰۷۳
	$5/91 - 10/71$	۳۱۴۹۸	۵	۱/۲۵	۰/۲۷			
	$10/71 - 15/9$	۵۵۰۴۳	۴	۰/۵۷	۰/۱۲			

در جدول بالا، Qft2: نهشته‌های کواترنری (مخروط‌افکنه‌های جدید)، Ktr: سازند تیرگان، KSj: سازند شوربجه، KSr: سازند سرچشمه، KSn: سازند سنگنانه، Kat: سازند آیتامیر، Qft1: نهشته‌های کواترنری (مخروط‌افکنه‌های قدیمی)، Mur: سازند قرمز بالایی، ال: سازند لار، TRJs: سازند شمشک، DCKh: آهک و شیل سبز و خاکستری به همراه فسیل، Jd: سازند دلیچای و Sn: سازند نیور هستند.

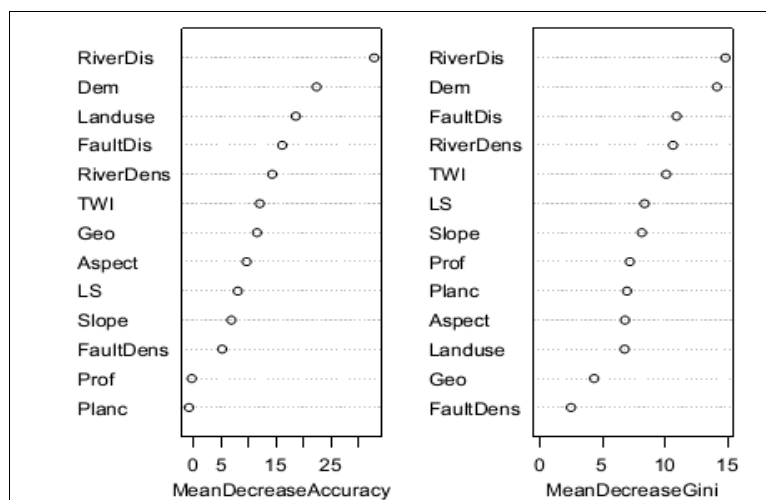
بجنورد وجود دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش تراکم زهکشی، تعداد وقوع چشمه کاهش می‌یابد.

همچنین براساس نتایج ارائه شده در جدول ۱ (W_{ij}) مشخص شد که عوامل کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از آبراهه، طبقه ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت شیب، تراکم گسل، درجه شیب، انحنای آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، انحنای سطح و طول شیب به ترتیب بیشترین وزن (۰/۳۳۸، ۰/۱۹۷، ۰/۱۷۷، ۰/۱۴۳، ۰/۱۴۰، ۰/۰۷۷، ۰/۰۷۳، ۰/۰۶۲، ۰/۰۶۰، ۰/۰۲۸، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۶، ۰/۰۰۳) را به خود اختصاص داده‌اند. در نهایت، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه تحقیق براساس مدل انتروپی شانون تهیه و در شکل ۳ ارائه شده است.

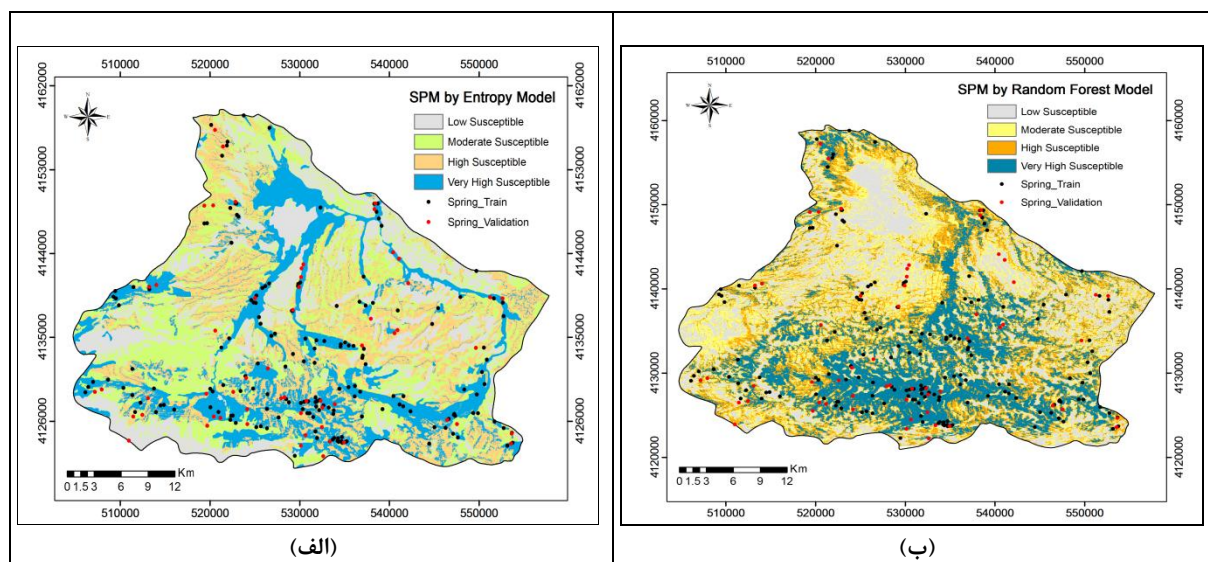
نتایج به دست آمده از مدل جنگل تصادفی در شکل ۲ ارائه شده است که در آن میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهشی جینی فاکتورهای مؤثر در مدل مذکور مشاهده می‌شود. براساس نتایج این مدل، عوامل فاصله از آبراهه و ارتفاع بیشترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی دارند. عوامل کاربری اراضی، فاصله کمتر از گسل، تراکم زهکشی کمتر، شاخص رطوبت توپوگرافی و زمین‌شناسی نیز به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین براساس مدل جنگل تصادفی انحنای سطح و انحنای آبراهه کمترین تأثیر را بر وقوع و پیدایش چشمه داشته‌اند. در شکل ۳ نقشه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی براساس مدل جنگل تصادفی نشان داده شده است.

بررسی عوامل دیگر نشان داده که بیشترین تعداد وقوع چشمه به ترتیب مربوط به کلاس‌های درجه شیب ۵ تا ۱۵ درجه، طول شیب ۰ تا ۳/۳۲ متر، تراکم زهکشی ۱/۸۸ تا ۲/۷۷، طبقه ۱۰/۰۳ تا ۱۲/۴۰ از عامل TWI، انحنای سطح مقعر و انحنای آبراهه محدب، کاربری زراعت دیم که تفاوت چندانی با زراعت آبی ندارد، لیتولوژی ال، فاصله از گسل کمتر از ۲۵۰۹ متر و تراکم گسل کمتر از ۱/۸۷ است. وجود رابطه معکوس بین فاصله از گسل و تعداد چشمه نیز از دیگر نتایج پژوهش حاضر است. این نتیجه بدان معناست که هرچه فاصله از گسل کمتر باشد، تعداد چشمه بیشتر است. دلیل این امر، امکان ورود آب زیرزمینی به سطح در مناطق نزدیک به گسل است. همچنین رابطه معکوس بین فاصله از آبراهه، تراکم گسل و طول شیب با وجود پتانسیل آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. در همین راستا زیاد بودن پتانسیل آب زیرزمینی الزاماً ناشی از افزایش نفوذ آب به سبب وجود گسل و تراکم زیاد آن نیست. نفوذ آب به اعماق و عدم ظهور بر سطح زمین در منطقه با تراکم زیاد گسل به سبب ساختار آن می‌تواند دلیلی بر کم بودن پتانسیل آب زیرزمینی در این مناطق باشد.

نتایج پژوهش حاضر در خصوص ارتباط پتانسیل آب زیرزمینی با تراکم زهکشی نشان داد که بیشترین تعداد چشمه در طبقه ۱/۸۱ تا ۲/۷۷ کیلومتر بر کیلومتر مربع از تراکم زهکشی قرار دارد. در همین زمینه، رابطه معکوس بین تراکم زهکشی و پتانسیل آب زیرزمینی در دشت



شکل ۲. میانگین کاهش دقت و میانگین کاهش جینی فاکتورهای مؤثر در مدل جنگل تصادفی به منظور تعیین پتانسیل آب زیرزمینی دشت بجنورد



شکل ۳. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون (الف) و جنگل تصادفی (ب)

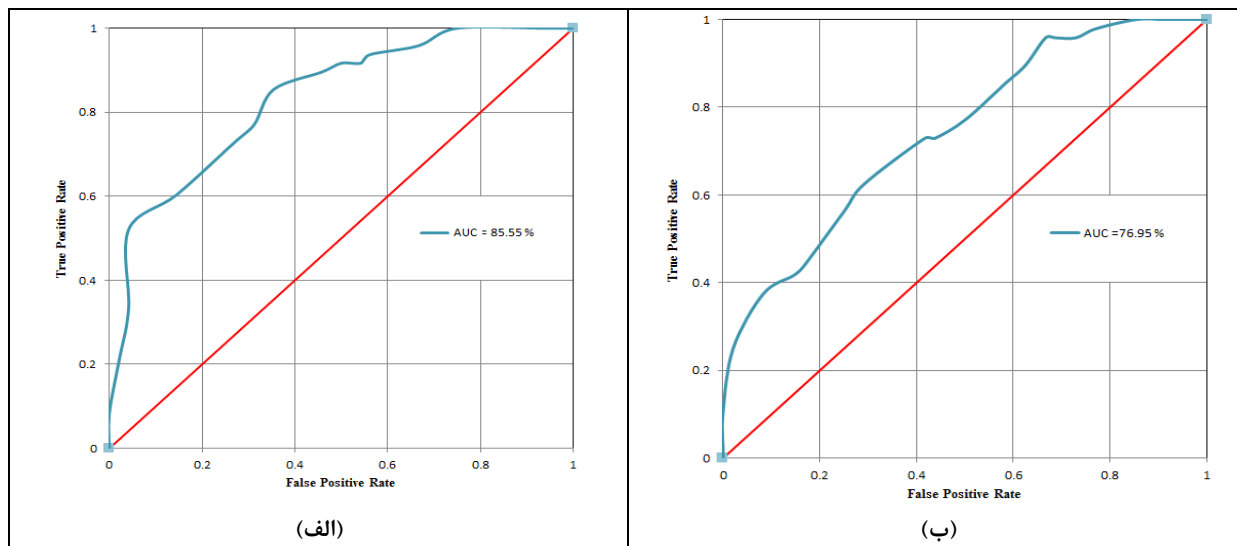
در مدلسازی عنوان کرد. به نحوی که در مدل جنگل تصادفی عوامل فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی و فاصله از گسل، مهم‌ترین عوامل اند و متعاقباً بیشترین وزن را در مدلسازی به خود اختصاص داده‌اند، اما در مدل انتروپی عوامل کاربری اراضی و لیتولوژی بیشترین وزن را دارند. همچنین براساس شکل ۴ مدل انتروپی شانون ارزیابی بهتری را در مدلسازی در مقایسه با مدل جنگل تصادفی از خود نشان داده است.

یکی از روش‌های تعیین دقت و ارزیابی مدل‌ها، استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) است. در پژوهش

طبق نتایج حاصل از تهیه نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی بر اساس مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی و ارائه شده در شکل ۳ مشخص می‌شود که نتایج دو مدل مذکور با یکدیگر تفاوت‌هایی دارد. به گونه‌ای که براساس مدل انتروپی شانون، مناطق با حساسیت کم از لحاظ آب زیرزمینی بیشتر در بخش شمالی منطقه تحقیق قرار گرفته است. در حالی که بر اساس مدل جنگل تصادفی بیشتر بخش جنوبی تحت پوشش مناطق با حساسیت کم پتانسیل آب زیرزمینی است. دلیل این امر را می‌توان در ساختار مدل‌های استفاده شده و عدم قطعیت‌های موجود

تصادفی با مقدار AUC برابر با ۷۶/۹۵ درصد عملکرد بهتری داشته است که این مقدار در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. شکل ۴ نتایج ارزیابی مدل‌های استفاده‌شده با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی را نشان می‌دهد.

حاضر ۳۰ درصد از چشمه‌ها برای مرحله ارزیابی استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی با استفاده از منحنی ROC نشان داد که مدل انتروپی شانون با مقدار AUC برابر با ۸۵/۵۵ درصد در مقایسه با مدل جنگل



شکل ۴. منحنی ROC و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون (الف) و جنگل تصادفی (ب)

بیشترین، و انحنای سطح و انحنای آبراهه کمترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی براساس مدل جنگل تصادفی در دشت بجنورد داشته‌اند. در ضمن پهنه‌بندی حساسیت پتانسیل آب زیرزمینی با مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی و ارزیابی دقت آنها با استفاده از منحنی ROC، بیانگر دقت خیلی خوب مدل انتروپی شانون (۸۵/۵۵ درصد) در مقایسه با مدل جنگل تصادفی (۷۶/۹۵ درصد) برای منطقه تحقیق است. بنابراین به‌عنوان پیشنهاد می‌توان بر نتایج مدل انتروپی شانون با توجه به دقت قابل قبول آن برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی تأکید داشت. حال از آنجا که تاکنون در کشور مطالعات محدودی در زمینه تهیه نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی صورت گرفته است، این مطالعه می‌تواند بیانگر وضعیت پتانسیل منابع آب زیرزمینی در دشت بجنورد باشد. نتایج حاصل، توجه مدیران و مسئولان امر در اتخاذ تصمیمات آتی مدیریت منابع آب و همچنین بهره‌برداری از آنها در منطقه تحقیق را می‌طلبد. در نهایت اجرای مطالعات بیشتر در منطقه مطالعاتی و حتی دیگر مناطق کشور به‌منظور ارزیابی‌های مقایسه‌ای توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه‌بر بودن آزمایش‌های اکتشافی منابع آب زیرزمینی، تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های نوین با هدف حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری صحیح از منابع آب امری حائز اهمیت است. هدف از پژوهش حاضر، اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی و پهنه‌بندی حساسیت آن در بخش جنوبی شهرستان بجنورد با استفاده از مدل‌های انتروپی شانون و جنگل تصادفی است. بدین منظور از ۱۳ عامل درجه شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، طول شیب، انحنای سطح و انحنای آبراهه، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، لیتولوژی، کاربری اراضی، تراکم زهکشی و تراکم گسل به‌عنوان عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شد. اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از مدل انتروپی شانون نشان داد که لایه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از آبراهه و طبقه ارتفاعی، بیشترین تأثیر؛ و عوامل انحنای سطح و طول شیب، کمترین تأثیر را بر وقوع چشمه در منطقه تحقیق داشته‌اند. در این خصوص فاصله از آبراهه و ارتفاع نیز

- [7]. Bednarik, Martin. Magulova, Barbora, Matys. Mirko, and Marschalko, Marian, 2010, Landslide susceptibility assessment of the Kralovany–Liptovsky Mikulaš railway case study, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol 35, pp162–171.
- [8]. Chenini, Ismail. Ben Mammou, Abdallah, and May, Moufida El, 2010, Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in Central Tunisia (Maknassy Basin), *Water Resources Management*, vol 24 (5), pp 921–939.
- [9]. Chowdhury, Alivia. Jha, Madan, Chowdary, Vuy, and Mal, Bimal C, 2009, Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India, *International Journal of Remote Sensing*, vol 30, pp 231–250.
- [10]. Constantin, Mihaela. Bednarik, Martin, Jurchescu, Marta, and Vlăicu, Marius, 2011, Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania), *Environmental Earth Science*, vol 63, pp 397–406.
- [11]. Corsini, Alessandro. Cervi, Federico, and Ronchetti, Francesco, 2009, Weight of evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy), *Geomorphology*, vol 111, pp 79–87.
- [12]. Dar, Imran. Sankar, Kristian, and Dar, Mithas, 2010, Remote sensing technology and geographic information system modeling: an integrated approach towards the mapping of groundwater potential zones in Hardrock terrain, Mamundiyyar basin, *Journal of Hydrology*, vol 394, pp 285–295.
- [13]. DavoodiMoghaddam, Davood. Rezaei, Mojtaba, Pourghasemi, Hamid Reza, Pourtaghi, Zohre Sadat, and Pradhan, Biswajeet, 2013, Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran, *Arabian Journal of Geoscience*, vol 8, pp 913–929.
- [14]. Fitts, Charles, *Groundwater Science*, Academic Press (Elsevier), 2002, pp 450.
- [15]. Ganapuram, Sreedhar. Vijaya Kumar, Ganiga T, Murali, Krishna, Kahya, Ercan, and Demirel, Cuneyd, 2009, Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS, *Advance Engineering Software*, vol 40, pp 506–518.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی و اداری باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی در راستای اجرای پژوهش حاضر در قالب طرح پژوهشی و زحمات و مساعدت‌های رئیس باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد بجنورد جناب آقای دکتر وحید جاجرمی تشکر و قدردانی کنند.

منابع

- [۱]. ابراهیم‌خانی، سمیه؛ افضل، مهدی؛ شکوهی، علی، ۱۳۹۰، پیش‌بینی و بررسی عوامل تصادفات جاده‌ای با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی، فصلنامه دانش انتظامی زنجان، شماره ۱، سال اول: ۱۲۷–۱۱۱.
- [۲]. پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ فاطمی عقدا، سید محمود، ۱۳۹۲، تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در شمال شهر تهران، مجله پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۱۰: ۶۳–۷۸.
- [۳]. ذبیحی، محسن؛ شاهدی، کاکا؛ دارابی، حمید؛ صفری، عطا، ۱۳۹۲، مطالعه خشکسالی هواشناسی دشت بجنورد با استفاده از شاخص‌های PNPI، SPI، ZSI، NITZCHE و DI، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، بهمن ماه، تهران، ایران.
- [۴]. فرشاد، محمد؛ ساده، جواد، ۱۳۹۲، مکان‌یابی خطای اتصال کوتاه در خطوط انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا با استفاده از شبکه عصبی، رگرسیون تعمیم‌یافته و الگوریتم جنگل تصادفی، سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق، سال چهارم، شماره ۲: ۱۴–۱.
- [۵]. فضل‌اولی، رامین؛ شریفی، فرود؛ بهنیا، عبدالکریم، ۱۳۸۵، بررسی تأثیر پخش سیلاب در تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی دشت موسیان (استان ایلام)، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۹، شماره ۱: ۷۴–۵۴.
- [۶]. محمدی، حسین مراد؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر، ۱۳۸۲، تأثیر خشکسالی‌های اخیر در افت منابع آب زیرزمینی دشت‌های شمال همدان، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۵: ۱۳۰–۱۱۵.

- [16]. Gaur, Shishir. Chahar, Bhagu R, and Grailot, Didier, 2011, Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol 13, pp 127–139.
- [17]. Ghayoumian, Jafar. Mohseni, Seyed Mohsen, Feiznia, Sadat, Nouri, Behzad, and Malekian, Arash, 2007, Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol 30, pp 364–374.
- [18]. Gupta, Manika, and Srivastava, Prashant, 2010, Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India, *Water International* vol 35, pp 233–245.
- [19]. Jain, Pradeep. 1998, Remote sensing techniques to locate ground water potential zones in upper Urmil River basin, district Chatarpur-central India, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol 26, pp 135–147.
- [20]. Jha, Madan. Chowdhury, Alivia, Chowdary, Vuy, and Peiffer, Stefan, 2007, Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints, *Water Resources Management*, vol 21, pp 427–467.
- [21]. Krishnamurthy, Jayasree. Srinivas, Rao G, 1995, Role of geological and geomorphological factors in groundwater exploration: a study using IRS LISS data, *International Journal of Remote Sensing*, vol 16(14), pp 2595–2618.
- [22]. Manap, Mohamad Abd. Nampak, Haleh, Pradhan, Biswajeet, Lee, Saro, Soleiman, Wan Nor Azmin, and Ramli, Mohammad Firuz, 2012, Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS, *Arabian Journal of Geosciences*, vol 7, pp 711–724.
- [23]. Mukherjee, Soumyajit. 1996, Targeting saline aquifer by remote sensing and geophysical methods in a part of Hamirpur Kanpur, India, *Hydrogeology Journal*, vol 19, pp 1867–1884.
- [24]. Murthy, K Sri Rama. 2000, Groundwater potential in a semi-arid region of Andhra Pradesh- a geographical information system approach, *International Journal of Remote Sensing*, vol 21(9), pp 1867–1884.
- [25]. Murthy, K Sri Rama. and Mamo, Abiy Gatachew, 2009, Multi-criteria decision evaluation in groundwater zones identification in Moyale-Teltelesubbasin, South Ethiopia, *International Journal of Remote Sensing*, vol 30, pp 2729–2740.
- [26]. Naghibi, Seyed Amir. Pourghasemi, Hamid Reza, Pourtaghi Zohre Sadat, and Rezaei, Ashkan, 2014, Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran, *Journal of Earth Science*, vol 8 (1), pp 171–186.
- [27]. Nefeslioglu, Hakan. Duman, Tamar, and Durmaz, Serap, 2008, Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey), *Geomorphology*, vol 94, pp 401–418.
- [28]. Nicodemus, Kristin K. 2011, Letter to the Editor: On the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures predictors from random forest variable importance measures, *Brief Bio-inform*, vol 12 (4), pp 369–373.
- [29]. Oh, Hyun-Joo. Kim, Yong-Sung, Choi, Jong-Kuk, Park, Eungyu, and Lee, Saro, 2011, GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea, *Journal of Hydrology*, vol 399, pp 158–172.
- [30]. Ozdemir, Adnan. 2011, GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison, *Journal of Hydrology*, vol 41, pp 290–308.
- [31]. Pourghasemi, Hamid Reza. GoliJirandeh, Abbas, Pradhan, Biswajeet, Xu, Chong, and Gokceoglu, Candan, 2013, Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS, *Journal of Earth System Science*, vol 122 (2), pp 349–369.
- [32]. Pourghasemi, Hamid Reza. Mohammady, Majid, and Pradhan, Biswajeet, 2012, Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran, *Catena*, vol 97, pp 71–84.
- [33]. Pourghasemi, Hamid Reza. Moradi, Hamid Reza, FatemiAghda, Seyed Mahmood, Gokceoglu, Candan, and Pradhan, Biswajeet, 2014, GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi criteria evaluation models (North of Tehran, Iran), *Arabian Journal of Geoscience*, vol 7, pp 1857–1878.
- [34]. Pourtaghi, Zohre Sadat. and Pourghasemi, Hamid Reza, 2014, GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the

- Birjand Township, southern Khorasan Province. Iran, *Hydrogeology Journal*, vol 22, pp 643-662.
- [35]. Pradhan, Biswajeet. 2009, Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques, *Central European Journal of Geosciences*, vol 1(1), pp 120–129.
- [36]. Pradhan, Biswajeet. and Lee, Saro, 2010, Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: back propagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling, *Environmental Modeling and Software*, vol 25 (6), pp 747–759.
- [37]. Rao, Subba, 2006. Groundwater potential index in a crystalline terrain using remote sensing data: *Environmental Geology*, vol 50 (7), pp 1067–1076.
- [38]. Sener, Erhan. Davraz, Aysen, and Ozcelik, Mehmet, 2005, An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur, Turkey, *Hydrogeology Journal*, vol 13, pp 826–834.
- [39]. Shannon, Claude. 1948, A mathematical theory of communication, *Bulletin System, Technology Journal*, vol 27, pp 379–423.