

## تعیین پتانسیل آب زیرزمینی منطقه تربت جام با استفاده از روش بیشینه آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی

مهدی تیموری\*<sup>۱</sup> و امید اسدی نلیوان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی شیروان و <sup>۲</sup> دکتری آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

### چکیده

با افزایش جمعیت، اهمیت منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از مهمترین منابع تأمین کننده آب شرب در مناطق خشک بیش از پیش آشکار می شود. در این پژوهش، به منظور تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی شهرستان تربت جام و اولویت بندی عوامل موثر از روش های تحلیل سلسله مراتبی و روش بیشینه آنتروپی با استفاده از مدل MaxEnt و عوامل فاصله و تراکم گسل، سنگ شناسی، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، انحنای دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافیک و شاخص موقعیت توپوگرافیک استفاده شده است. همچنین، برای ارزیابی این دو روش، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. از مجموع ۲۲۰ چشمه موجود، به صورت تصادفی ۳۰ درصد به عنوان داده های اعتبارسنجی و ۷۰ درصد به عنوان داده های آزمون (روش بیشینه آنتروپی) طبقه بندی شدند. بر اساس روش بیشینه آنتروپی، نتایج نشان داد که ۲۹/۶ درصد حوزه آبخیز دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالایی است. بر اساس نمودار چکنایف، لایه های ارتفاع (DEM)، شیب، فاصله از گسل و سنگ شناسی به ترتیب مهمترین عوامل تاثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی بودند. سطح زیر منحنی (AUC) در روش بیشینه آنتروپی، نشان دهنده دقت ۹۱ درصد (عالی) در مرحله آموزش و ۸۰ درصد (خیلی خوب) در مرحله اعتبارسنجی برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی بود. بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی، ۳۴/۴ درصد حوضه دارای پتانسیل آب زیرزمینی می باشد و لایه های شیب، سنگ شناسی، ارتفاع و فاصله از گسل به ترتیب مهمترین عوامل تاثیرگذار بودند و دقت این روش ۷۳ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد که به کارگیری روش های تحلیل سلسله مراتبی و روش بیشینه آنتروپی، ضمن صرفه جویی در زمان و هزینه، قابلیت مناسبی در پیش بینی پتانسیل آب زیرزمینی دارند و روش بیشینه آنتروپی برتری بیشتری نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی دارد.

**واژه های کلیدی:** اعتبارسنجی، منابع آب، منحنی تشخیص عملکرد، MaxEnt، AHP

### مقدمه

انسان بوده، در طی دهه های اخیر بر اثر برداشت بیشتر از تغذیه با کاهش کمی و کیفی روبرو شده است (Deng و همکاران، ۲۰۱۶). مدیریت و جلوگیری از تشدید این مشکلات از طریق اکتشاف و بهره برداری

منابع آب زیرزمینی به دلیل دمای ثابت، ضریب آلودگی کمتر، ضریب اطمینان بالاتر و نوسانات کمتر به عنوان یک گزینه مطمئن از دیرباز مورد استفاده

فازی و بیشینه آنتروپی اشاره کرد (Arabameri و همکاران، ۲۰۱۸؛ Zabihi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Deepa و همکاران، ۲۰۱۶؛ Lee و همکاران، ۲۰۱۹؛ Arulbalaji و همکاران، ۲۰۱۹). در این پژوهش، از روش بیشینه آنتروپی (مدل MaxEnt)، روش تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است. در زمینه تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است. Razavi و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی سه روش نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی در شهرستان جهرم به این نتیجه رسیدند که روش آنتروپی برتری بیشتری نسبت به دو مدل دیگر دارد و عوامل توان آبراهه، ارتفاع، شیب و کاربری اراضی تاثیر بیشتری بر پتانسیل آب زیرزمینی دارند.

Arulbalaji و همکاران (۲۰۱۹) از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی با کمک ۱۲ لایه محیطی برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی استفاده کردند و دقت روش مذکور را ۸۵ درصد بیان کردند. Golkarian و Rahmati (۲۰۱۸) با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی به بررسی پتانسیل آب زیرزمینی در دشت گناباد پرداختند و عوامل تراکم قنات، فاصله از رودخانه، لیتولوژی،  $SPI^1$  و  $TWI^2$  را به‌عنوان عوامل تاثیرگذار معرفی کردند. Agarwal و Garg (۲۰۱۶) با استفاده از RS و ArcGIS و بهره‌گیری از تکنیک AHP به نقشه‌بندی مناطق تغذیه و پتانسیل تولید آب زیرزمینی در هند پرداختند. آن‌ها بیان داشتند، منطقه دارای پتانسیل بالا (طبقه عالی) تحت پوشش رودخانه گنگ بوده است که نشان از ارتباط آب سطحی و زیرزمینی است. از دیگر پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به مطالعات Zabihi و همکاران (۲۰۱۶)، Al-Abadi و همکاران (۲۰۱۶)، Rahmati و همکاران (۲۰۱۵)، Kordestani و همکاران (۲۰۱۸)، Manap و همکاران (۲۰۱۳)، Sahoo و همکاران (۲۰۱۷)، Rahimi و Solaimani (۲۰۱۷) و Thilagavathi و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد. در دهه اخیر، پس از معرفی روش AHP به‌وسیله

متناسب با پتانسیل آن در راستای اهداف توسعه پایدار یکی از استراتژی‌های منتخب در این زمینه است (Adiat و همکاران، ۲۰۱۲؛ Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از مهمترین روش‌های مطالعه در این زمینه، بررسی عوامل محیطی مرتبط با تشکیل منابع آب و استفاده از روش‌هایی مثل روش بیشینه آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی با بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی است (Arulbalaji و همکاران، ۲۰۱۹؛ Naghibi و همکاران، ۲۰۱۸). اصولاً روش‌های سنتی که در جهت شناخت پتانسیل آب‌های زیرزمینی به‌کار گرفته می‌شوند، غالباً نیازمند صرف وقت و هزینه و نیروی انسانی زیادی هستند و در این راستا، مدل‌های تصمیم‌گیری و یادگیری ماشینی به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور می‌توانند به‌عنوان یک تکنیک سریع و مدرن مورد استفاده قرار گیرند (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۵؛ Sener و همکاران، ۲۰۱۸؛ Rahmati و Golkarian، ۲۰۱۸). از طرفی، شناسایی محل‌های دارای پتانسیل آب زیرزمینی در مناطقی که وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی دارند، ضروری است. در نتیجه، برای مدیریت منابع آب زیرزمینی شناسایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی و مدنظر قرار دادن آن حائز اهمیت می‌باشد. عوامل مختلفی از قبیل عوامل اکولوژیک (کاربری اراضی، بافت خاک و نوع خاک)، عوامل اقلیمی (بارندگی)، عوامل هیدرولوژیکی (شاخص توان آبراهه (SPI)، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و فاصله از آبراهه)، عوامل توپوگرافیک (ارتفاع، شیب، جهت شیب و انحنا توپوگرافیک) و عوامل ژئولوژیکی (لیتولوژی، فاصله از گسل و تراکم گسل) بر میزان پتانسیل آب زیرزمینی تاثیرگذار هستند (Razavi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Razandi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Ghorbani و همکاران، ۲۰۱۷؛ Golkarian و همکاران، ۲۰۱۸؛ Mousavi و همکاران، ۲۰۱۷).

در زمینه تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به روش‌های شاخص آنتروپی، نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک، تحلیل سلسله مراتبی، شاخص هم‌پوشانی وزنی، جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی، منطق

<sup>1</sup> Stream Power Index

<sup>2</sup> Topographic Wetness Index

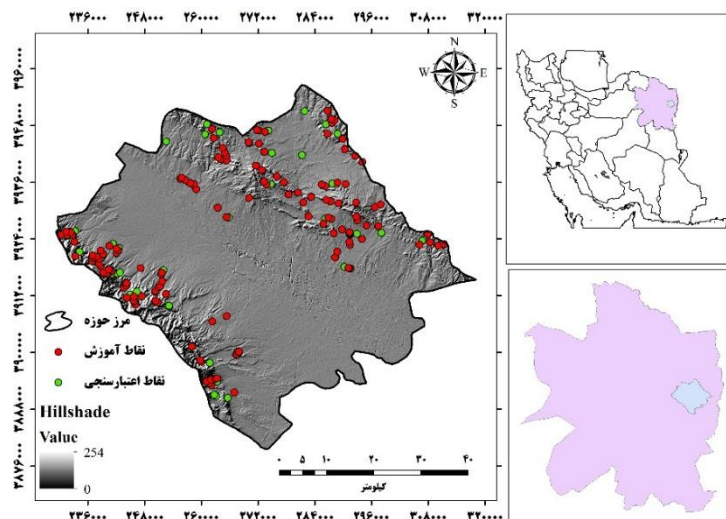
بیشینه آنتروپی) و تحلیل سلسله مراتبی به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی با به‌کارگیری عوامل مختلف محیطی برای تهیه نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت تربت‌جام قرار گرفت. مقایسه دو روش تحلیل سلسله مراتبی مبتنی بر نظرات کارشناسی و روش بیشینه آنتروپی مبتنی بر لایه‌های محیطی از نقاط برجسته پژوهش حاضر است.

### مواد و روش‌ها

شهرستان تربت‌جام یکی از شهرستان‌های مرکزی استان خراسان رضوی می‌باشد که بین  $35^{\circ} 01'$  تا  $34^{\circ} 58'$  طول شرقی و  $61^{\circ} 17'$  عرض شمالی قرار گرفته است. بر اساس آخرین تقسیمات سیاسی، این شهرستان دارای پنج بخش به نام‌های مرکزی، صالح‌آباد، نصرآباد، پایین‌جام و بوژگان است. در پژوهش حاضر، بخش‌های مرکزی و نصرآباد انتخاب شده است. شکل ۱، موقعیت منطقه را در ایران و استان نشان می‌دهد. مساحت منطقه  $3489$  کیلومتر مربع و محیط آن  $416$  کیلومتر است.

پروفسور Saaty (۱۹۸۰) به‌عنوان یک روش نوین تصمیم‌گیری، محققان بسیاری اقدام به اقتباس از این روش و کاربرد آن در مطالعات منابع آب کرده‌اند. از روش بیشینه آنتروپی برای اولین بار در سال ۲۰۱۶ برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است. روش بیشینه آنتروپی می‌تواند به‌عنوان گامی نو به‌منظور سرعت بخشیدن به شناسایی نقاط دارای پتانسیل آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد (Razandi و همکاران، ۲۰۱۵).

تربت‌جام از نظر شرایط اقلیمی جزء مناطق نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود و همچنین، رشد روز افزون جمعیت شهری، نیاز به توسعه کشاورزی و دامداری به شیوه جدید برای پاسخ‌گویی به نیازهای جمعیتی در حال رشد، سبب شده است که منطقه مورد مطالعه از نظر تأمین منابع آب با مشکل روبرو باشد. لذا، ضرورت شناسایی وضعیت منابع آب در منطقه مورد مطالعه برای مدیریت هر چه بهتر این منابع مشهود است. در همین راستا، هدف این پژوهش، ارزیابی کارایی روش‌های یادگیری ماشینی



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان

(متر)، تراکم زهکشی (کیلومتر بر کیلومتر مربع)، فاصله از گسل (متر)، تراکم گسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و شاخص موقعیت توپوگرافیک (TPI) استفاده شده است. در این پژوهش، از مجموع ۲۲۰ چشمه موجود در منطقه،

**عوامل مورد استفاده برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی:** در پژوهش حاضر، برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی و بر اساس مرور منابع گسترده در این زمینه از ۱۲ عامل موثر بر پتانسیل آب زیرزمینی شامل شیب (درصد)، ارتفاع (متر)، جهت شیب، انحنای دامنه، فاصله از آبراهه

۲۰۱۹؛ Lee و همکاران، ۲۰۱۹)، لایه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی منطقه استخراج شد (جدول ۱). کاربری اراضی هم بر روی رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و تغذیه آب زیرزمینی اثرگذار است (Tehrany و همکاران، ۲۰۱۳). لایه‌های شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص موقعیت توپوگرافیک از مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شدند. شاخص TWI (رابطه ۱) تاثیر توپوگرافی بر روی تولید رواناب را به صورت کمی بیان می‌کند و اگر مقدار آن بالا باشد، بدین معناست که مساحت بالادست پیکسل زیاد و شیب کم است که باعث افزایش نفوذ آب می‌شود (Arulbalaji و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mokarram و همکاران، ۲۰۱۵). شاخص TPI شاخصی نسبی است که میزان تغییرات توپوگرافی یک پیکسل نسبت به پیکسل‌های اطراف را نشان می‌دهد (Yeh و همکاران، ۲۰۱۶). در واقع این شاخص تفاوت بین پیکسل مرکزی و میانگین سلول‌های اطراف را نشان می‌دهد (رابطه ۲).

$$TWI = \ln \frac{A_s}{\tan \beta} \quad (1)$$

که در آن،  $A_s$  مساحت منطقه مشارکت‌کننده بالادست یک سلول و  $\beta$  گرادیان توپوگرافی (شیب) است.

$$TPI = Z_0 - \frac{\sum_{i=1}^n Z_n}{n} \quad (2)$$

که در آن،  $Z_0$  ارتفاع نقطه تحت ارزیابی،  $Z_n$  ارتفاع شبکه اطراف نقطه تحت ارزیابی،  $n$  تعداد کل نقاط مورد استفاده در ارزیابی می‌باشد. لازم به ذکر است که کلیه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده دارای تفکیک مکانی ۲۸×۲۸ متر هستند.

**روش بیشینه آنتروپی و مدل MaxEnt:** استفاده از مدل‌هایی که تنها نیازمند داده‌های حضور (چشمه) هستند، می‌تواند از خطاهای حاصل از به‌کارگیری داده‌های عدم حضور اشتباه، جلوگیری کند. مدل MaxEnt یکی از الگوریتم‌های بسیار رایج یادگیری ماشینی است. اصل بیشینه آنتروپی بیان می‌دارد که در تخمین یک توزیع نامعلوم، توزیعی نزدیک به واقعیت است که دارای بیشینه آشفتنگی است (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶). ارزیابی این مدل با استفاده از منحنی ROC امکان‌پذیر است که سطح زیر نمودار AUC به‌دست آمده به‌عنوان معیاری از قدرت

به‌صورت تصادفی ۱۵۴ چشمه (۷۰ درصد) به‌عنوان داده‌های آزمون (یادگیری مدل) و ۶۶ چشمه (۳۰ درصد) به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی (صحت‌سنجی مدل) طبقه‌بندی شدند. لازم به ذکر است که در روش AHP، ۲۲۰ چشمه موجود برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. لایه مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از نقشه توپوگرافی تهیه شد. طبقات ارتفاعی باعث ایجاد شرایط اقلیمی متفاوت می‌شوند (Jothibasu و Anbazhagan، ۲۰۱۶)، توپوگرافی و ارتفاع از سطح زمین به‌عنوان عامل تاثیرگذار در نفوذ آب به درون زمین محسوب می‌شوند. به‌عبارت دیگر، در ارتفاعات زیاد نفوذ آب به درون زمین کمتر و رواناب بیشتر است. بنابراین، افزایش ارتفاع اثر معکوسی بر روی پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی دارد (Lee و همکاران، ۲۰۱۹). لایه‌های شیب، جهت شیب و انحنای دامنه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و به‌ترتیب از توابع Slope، Aspect و Curvature تهیه شد. افزایش شیب زمین باعث کاهش میزان آب نفوذی به زمین و افزایش رواناب می‌شود (Deng و همکاران، ۲۰۱۶؛ Machiwal و همکاران، ۲۰۱۱) و جهت شیب نیز بر میزان دریافت بارندگی اثرگذار است (Guo-Liang و همکاران، ۲۰۱۷). انحنای دامنه بر روی تجمع و پراکندگی جریان در شیب‌های مقعر و محدب تاثیرگذار است (Naghbi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Al-Abadi و همکاران، ۲۰۱۶). لایه‌های فاصله از آبراهه و فاصله از گسل و تراکم آبراهه و تراکم گسل بر اساس نقشه آبراهه‌ها و گسل‌های موجود در منطقه به‌ترتیب با استفاده از تابع Euclidean distance و Line Density در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. گسل‌ها به‌عنوان نقاط ضعف واحدهای زمین‌شناسی به شمار رفته، افزایش تراکم گسل‌ها نقش موثری در نفوذ و انتقال آب زیرزمینی داشته، به این ترتیب، برای پتانسیل آب زیرزمینی اهمیت دارد (Adiat و همکاران، ۲۰۱۲؛ Jothibasu و Anbazhagan، ۲۰۱۶؛ Golkarian و Rahmati، ۲۰۱۸). به‌دلیل اهمیت نوع سنگ‌شناسی و سازندهای موجود و خصوصیات وابسته به آن‌ها که عامل بسیار مهمی در پتانسیل منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود (Deng و همکاران، ۲۰۱۶؛ Agarwal و Garg، ۲۰۱۶؛ Arulbalaji و همکاران،

مزایای مدل MaxEnt قابلیت این مدل در شناسایی مهمترین متغیرهای تاثیرگذار و تحلیل حساسیت متغیرها به روش Jackknife می‌باشد (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶) که در این پژوهش، این مهم انجام شده است.

تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور مورد توجه قرار می‌گیرد (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به مرور منابع انجام شده، مقدار AUC به صورت زیر قابل طبقه‌بندی است: ضعیف (۰/۶-۰/۵)، متوسط (۰/۷-۰/۶)، خوب (۰/۸-۰/۷)، خیلی خوب (۰/۹-۰/۸) و عالی (۰/۹-۱). یکی از مهمترین

جدول ۱- خصوصیات واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

توضیحات	واحد	عهد-دوران	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
شیل و ماسه‌سنگ	Jks	مزوزوئیک	۱۹۶۵۴/۷	۵/۶۳
رسوبات نازک مخروط افکنه‌ای و رسوبات تراس دره‌ای	Qft2	سنوزوئیک	۱۹۵۸۷۷/۲	۵۶/۱۳
سنگ آهک و دولومیت	Pj	پالئوزوئیک	۱۱۰۲۸/۲	۳/۱۶
مارن و ماسه‌سنگ	Murm	سنوزوئیک	۵۵۸۱۴/۱	۱۶
ماسه‌سنگ و کنگلومرا	Plc	سنوزوئیک	۳۹۵۷۲/۵	۱۱/۳۴
آندزیت آتشفشانی	PAEav	سنوزوئیک	۱۶۲۹۸/۲	۴/۶۷
آمفیبولیت	pCmt1	پروتروزوئیک	۴۵۱۹/۳	۱/۲۹
فلیش توریدیتی	Kuft	مزوزوئیک	۶۲۲۱/۷	۱/۷۸

محاسبه شاخص سازگاری (رابطه ۳) به دست می‌آید. عنصر بردار ویژه از تقسیم سطر ماتریس ارزش‌گذاری ستون وزن‌ها به وزن معیارها به دست می‌آید.  $\lambda_{max}$  باید به تعداد معیارها و برای همه آن‌ها محاسبه شده و سپس، از مجموع آن‌ها  $CI$  حاصل می‌شود. شاخص دیگر، شاخص تصادفی است که به وسیله Saaty و Harker متناسب با تعداد معیارها به شرح جدول ۲ محاسبه و ارائه شده است. نهایتاً نرخ سازگاری از رابطه (۴) به دست می‌آید. کلیه محاسبات در نرم‌افزار Expert Choice صورت گرفته است.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n(n-1)} \quad (3)$$

که در آن،  $\lambda_{max}$  عنصر بردار ویژه و  $n$  تعداد معیارها می‌باشد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

در نهایت، وزن معیارها و زیرمعیارها از طریق تابع Raster calculator در هم ضرب و نقشه پتانسیل آب زیرزمینی بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی تهیه شد.

**روش تحلیل سلسله مراتبی:** در این روش، برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها از فرایند تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک بردار ویژه استفاده شد. این وزن‌دهی بر اساس اهمیت نسبی هر پارامتر در پتانسیل آب زیرزمینی انجام گرفت. برای انجام مقایسه‌های جفتی از مقیاس یک الی نه روش Saaty استفاده شد. در این فرایند، هر دو معیار با توجه به اهمیت نسبی آن‌ها در پتانسیل آب زیرزمینی، در قالب یک پرسش‌نامه، دو به دو مقایسه و در نهایت، ماتریس مقایسات جفتی و وزن نرمال شده معیارها محاسبه خواهد شد. برای مقایسات جفتی، از نظرات نه نفر از اساتید و کارشناس در زمینه تخصصی مربوط به آب زیرزمینی استفاده شده است. نرخ سازگاری در روش AHP، شاخصی است که سازگاری مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. این نرخ گویای درجه صحت و دقت ارزش‌گذاری‌ها در مقایسات زوجی است. چنانچه نرخ مذکور برابر و کمتر از ۰/۱ شود، می‌توان ارزش‌گذاری‌ها و مقایسات را صحیح دانست. نرخ سازگاری از طریق

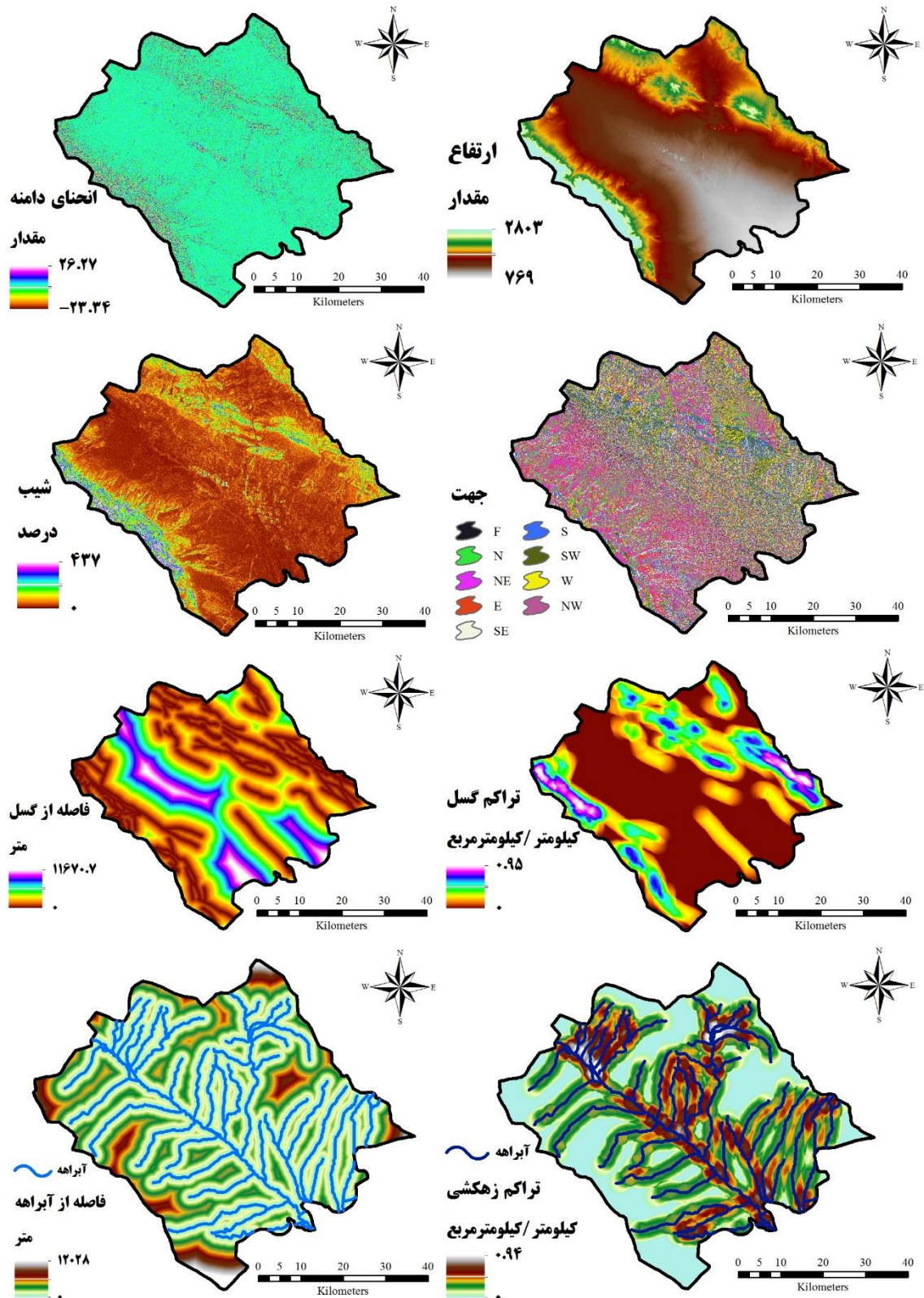
جدول ۲- شاخص‌های تصادفی برای ماتریس‌های n بعدی

تعداد معیار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵

**نتایج و بحث**

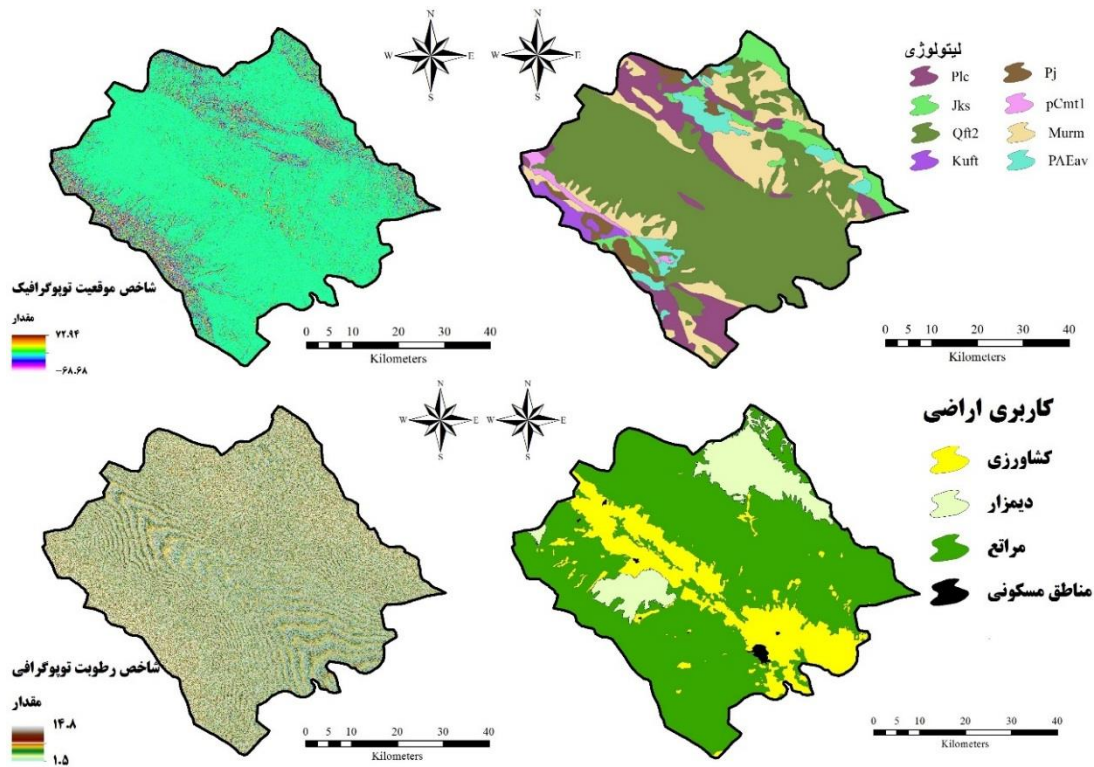
اساس شکل، ارتفاع منطقه از مرکز به طرف شرق و غرب در حال افزایش است و مرکز منطقه حالت دشتی دارد.

شکل ۲، لایه‌های مورد استفاده برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. بر



شکل ۲- نقشه لایه‌های مورد استفاده در تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی





ادامه شکل ۲- نقشه لایه‌های مورد استفاده در تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی

به خود اختصاص داده است که به دلیل تراکم زیاد گسل در این بازه ارتفاعی و نفوذ آب بیشتر از طریق گسل به زیر زمین است و این بخش با نتایج Zabihi و همکاران (۲۰۱۵)، Al-Abadi و همکاران (۲۰۱۶) و Arulbalaji و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد. همچنین، با افزایش ارتفاع، کاهش پتانسیل آب زیرزمینی رخ داده است که با نتایج Razandi و همکاران (۲۰۱۵) و Lee و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد و دلیل آن را عدم تشکیل آبخوان با ضخامت زیاد در ارتفاعات بالا بیان کردند که این موضوع برای پژوهش حاضر نیز صدق می‌کند.

دامنه میانی (۱- تا صفر) انحناى دامنه بیشترین سهم را در پتانسیل آب زیرزمینی داشته است که بیشتر مناطق مسطح را نشان می‌دهد و دلیل این امر کاهش شیب در این مناطق می‌باشد. Al-Abadi و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کردند که انحناى کمتر از یک بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی دارد. لازم به ذکر است که با افزایش میزان انحناى دامنه پتانسیل آب زیرزمینی روند ثابتی داشته است. بین تراکم گسل و پتانسیل آب زیرزمینی رابطه مستقیم

بر اساس شاخص انحناى دامنه، بیشتر سطح منطقه حالت دشتی دارد و کمتر حالت محدب و مقعر می‌باشد. شیب حوضه نیز بیشتر حالت فلات (دشت) را نشان می‌دهد. تراکم گسل، بیشتر در مناطق کوهستانی حوضه به چشم می‌خورد. تراکم آبراهه در سطح حوضه تقریباً حالت یکنواخت دارد. شاخص موقعیت توپوگرافیک حوضه نیز بیشتر حالت میانی دارد و به صفر نزدیک است. شاخص رطوبت توپوگرافی در سطح حوضه تقریباً به صورت یکنواخت توزیع شده است. همچنین، بیشترین سطح منطقه را رسوبات مخروط افکنه‌ای (Qft2) و مراتع تشکیل داده‌اند.

شکل ۳، تاثیر ۱۲ پارامتر مورد استفاده در این پژوهش را بر روی پیش‌بینی مدل MaxEnt نشان می‌دهد. این شکل، به ترتیب از سمت راست به چپ پارامترهای ارتفاع (DEM)، انحناى دامنه، تراکم گسل، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص موقعیت توپوگرافیک، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی و لیتولوژی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج دامنه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بیشترین تعداد چشمه را

این امر ارتباط بین آب زیرزمینی و آب سطحی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که تا فاصله ۵۰۰۰ متری از آبراهه پتانسیل آب زیرزمینی افزایش پیدا کرده است و از این فاصله به بعد پتانسیل کاهش پیدا کرده است. دلیل افزایش پتانسیل آب تا فاصله ۵۰۰۰ متری از آبراهه‌ها وجود تراکم گسل بالا (Haghizadeh و همکاران، ۲۰۱۷) در این مناطق می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی پتانسیل آب زیرزمینی افزایش پیدا کرده است، ولی در حالت کلی روند ثابتی نداشته است و در بعضی موارد با افزایش TWI کاهش پتانسیل اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده افزایش تراکم آبراهه در این مناطق و خروج آب به‌صورت رواناب و همچنین، افزایش تعداد چشمه (Rahmati و Golkarian، ۲۰۱۸) می‌باشد.

همچنین، Arulbalaji و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که با افزایش TWI پتانسیل آب زیرزمینی افزایش پیدا می‌کند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. نتایج نشان‌دهنده یک روند کاملاً ثابت کاهش پتانسیل آب زیرزمینی با افزایش TPI است. مقدار TPI نشان‌دهنده مناطق با شیب بالا و مناطق تپه‌مانند است که باعث افزایش رواناب می‌شود (Arulbalaji و همکاران، ۲۰۱۹) و لذا، نتیجه پژوهش حاضر منطقی می‌باشد. روند کلی افزایش شیب باعث کاهش نفوذ آب می‌شود، این در حالی است که در پژوهش حاضر تا شیب ۶۰ درصد پتانسیل آب زیرزمینی افزایش پیدا کرده است که دلیل اصلی این موضوع تراکم گسل بالا در این محدوده شیب است. همچنین با افزایش شیب، پتانسیل آب زیرزمینی کاهش پیدا کرده است که دلیل آن نیز افزایش رواناب در شیب‌های بالا می‌باشد و با نتایج Arabameri و همکاران (۲۰۱۸)، Al-Abadi و همکاران (۲۰۱۶)، Agarwal و Garg (۲۰۱۶)، Lee و همکاران (۲۰۱۹) و Deng و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

جهت غربی در این پژوهش، بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب ایفا کرده است که نشان‌دهنده دریافت بارش بیشتر در این جهت می‌باشد. البته تراکم گسل نیز مزید بر علت بوده است (Haghizadeh و همکاران، ۲۰۱۷) که بیشترین نمود را در این جهت داشته‌اند. کاربری مرتع بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب

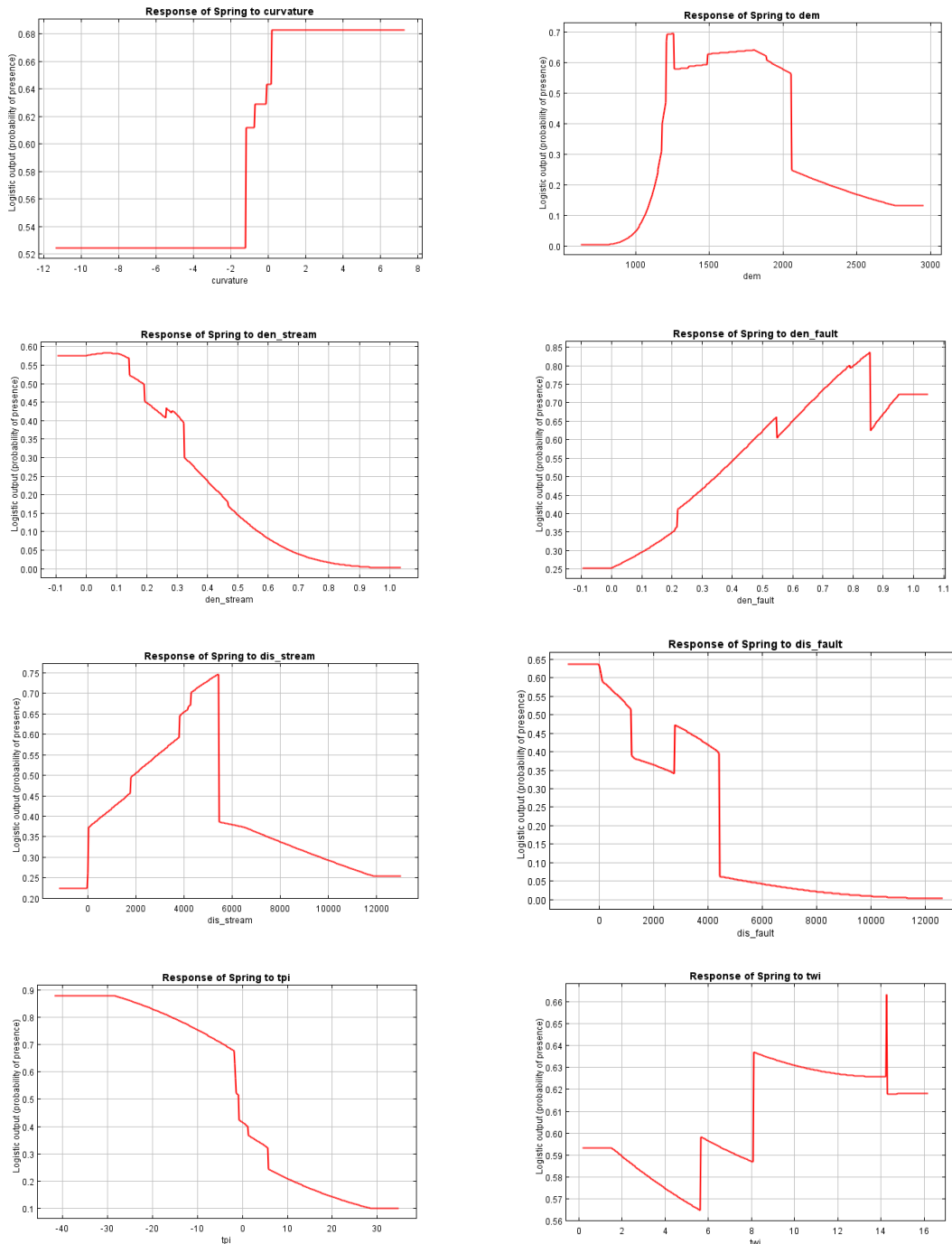
برقرار بوده است که نشان از اهمیت گسل‌ها در تغذیه آب زیرزمینی است و با نتایج Deng و همکاران (۲۰۱۶)، Rahmati و همکاران (۲۰۱۵)، Thilagavathi و همکاران (۲۰۱۵)، Arulbalaji و همکاران (۲۰۱۷)، Haghizadeh و همکاران (۲۰۱۷)، Rahimi و Solaimani (۲۰۱۷) مطابقت دارد. این در حالی است که Zabihی و همکاران (۲۰۱۵) رابطه معکوس بین این دو را به دلیل نفوذ آب به اعماق در اثر تراکم زیاد گسل و عدم ظهور آب در سطح زمین بیان کردند. در بعضی موارد کاهش پتانسیل آب زیرزمینی در اثر افزایش تراکم گسل، نشان‌دهنده اثر گسل بر انتقال آب به مناطق دیگر می‌باشد (Rahmati و Golkarian، ۲۰۱۸).

نتایج نشان‌دهنده ظهور چشمه‌ها در مناطق با تراکم گسل بالا و روند نزولی کاهش فراوانی در مناطق با تراکم گسل پایین است. با افزایش تراکم آبراهه پتانسیل آب زیرزمینی کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده کاهش نفوذ آب در این مناطق به دلیل خروج آب به‌صورت رواناب می‌باشد که با نتایج Zabihی و همکاران (۲۰۱۵)، Agarwal و Garg (۲۰۱۶) و Saraf و Chaudhary (۲۰۰۵) مبنی بر رابطه معکوس بین تراکم آبراهه و پتانسیل آب زیرزمینی مطابقت دارد. این در حالی است که Arabameri و همکاران (۲۰۱۸) بیان داشتند که بین تراکم آبراهه و پتانسیل آب رابطه‌ای وجود ندارد. گسل نقشی دوگانه در نفوذ آب دارد و می‌تواند هم مثبت هم منفی باشد. مثبت از لحاظ نفوذ آب به آبخوان و منفی از لحاظ انتقال آب به مناطق دورتر از آبخوان و از دسترس خارج شدن آب زیرزمینی مد نظر می‌باشد. بین فاصله از گسل و تعداد چشمه‌ها رابطه معکوس برقرار بوده، با افزایش فاصله از گسل پتانسیل آب زیرزمینی کمتر شده است. یکی از دلایل این امر، افزایش میزان نفوذ آب زیرزمینی در مناطق نزدیک به گسل می‌باشد که با نتایج Zabihی و همکاران (۲۰۱۵) و Arabameri و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. بین فاصله از آبراهه و پتانسیل آب در حالت کلی، رابطه معکوس برقرار است و با افزایش فاصله از آبراهه پتانسیل کمتر خواهد شد. نتایج Arabameri و همکاران (۲۰۱۸) و Zabihی و همکاران (۲۰۱۵) نیز همین مورد را تاکید کرده‌اند.

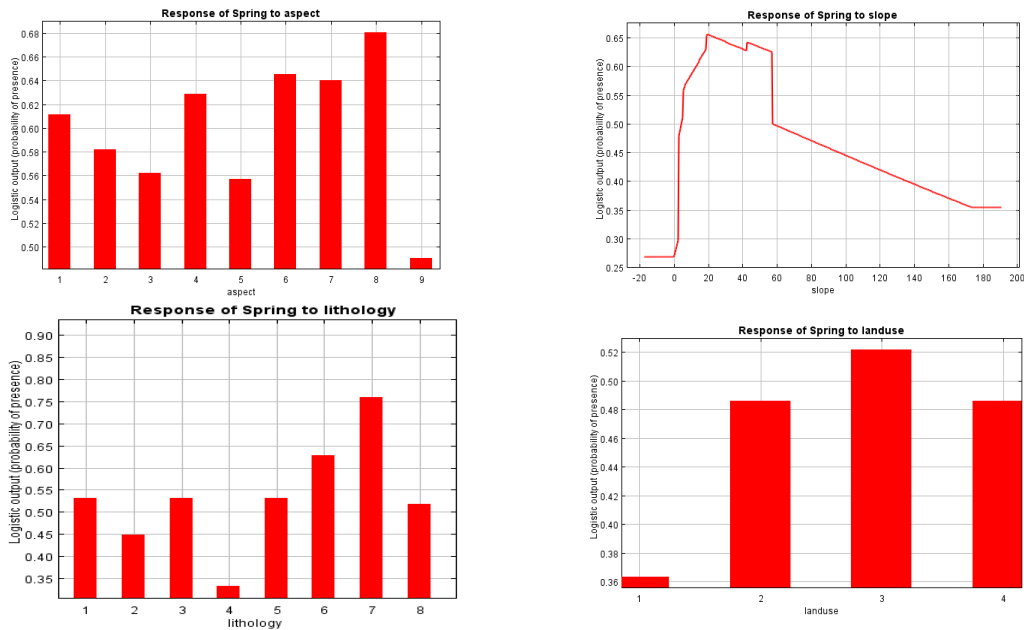


سنگ‌ها توانایی بالایی در جذب و ذخیره آب دارند (Soleimani و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rahimi، ۲۰۱۲؛ Haghizadeh و همکاران، ۲۰۱۷) و از طرفی، نیز گسل‌های موجود در منطقه مزید بر علت شده‌اند و افزایش پتانسیل در این مناطق اتفاق افتاده است.

زیرزمینی داشته است که از دلایل آن می‌توان به بارش بیشتر در این مناطق و همچنین، بیشترین و بالاترین میزان تراکم گسل در این کاربری دانست. در بخش لیتولوژی ماسه‌سنگ، کنگلومرا و دولومیت بیشترین میزان مشارکت در پتانسیل آب زیرزمینی را داشته‌اند. این نتیجه دور از انتظار نیست، چرا که این



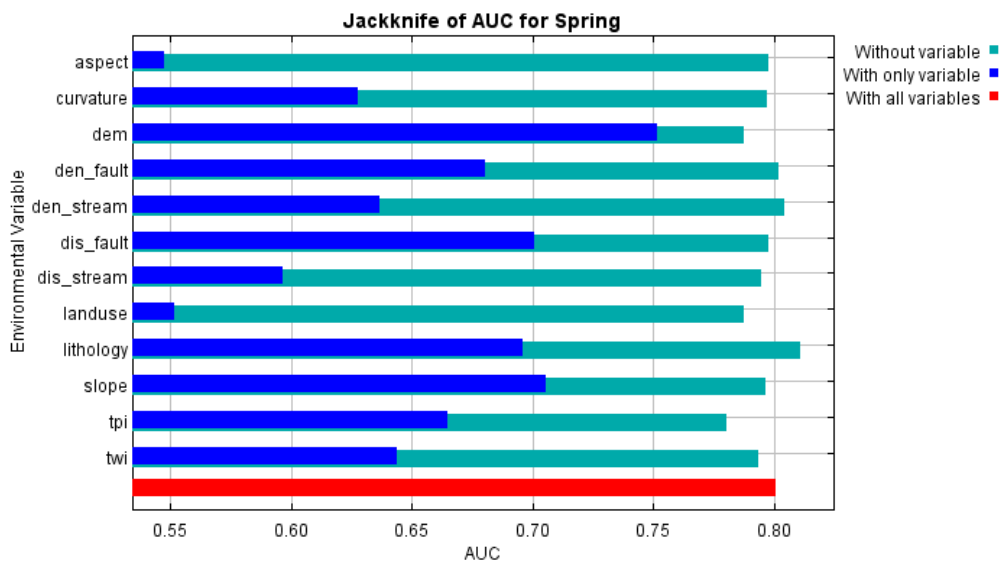
شکل ۳- تاثیر پارامترهای مورد استفاده بر پیش‌بینی مدل MaxEnt



ادامه شکل ۳- تاثیر پارامترهای مورد استفاده بر پیش‌بینی مدل MaxEnt

۲۰۱۸؛ Kazemi و همکاران، ۲۰۱۵)، لیتولوژی (Zabihi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Arabameri و همکاران، ۲۰۱۸؛ Golkarian و Rahmati، ۲۰۱۸؛ Haghizadeh و همکاران، ۲۰۱۷؛ Lee و همکاران، ۲۰۱۹؛ Arulbalaji و همکاران، ۲۰۱۹) و تراکم گسل (Haghizadeh و همکاران، ۲۰۱۷؛ Arulbalaji و همکاران، ۲۰۱۹) به ترتیب مهمترین عوامل تاثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی بوده‌اند.

شکل ۴، نتایج حاصل از نمودار Jackknife (روش بیشینه آنتروپی) برای تعیین مهمترین پارامترهای تاثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها را در پیش‌بینی مدل نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که لایه‌های ارتفاع (Zabihi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Razavi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Lee و همکاران، ۲۰۱۹؛ Al-Abadi و همکاران، ۲۰۱۶)، شیب (Razavi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Kazemi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Haghizadeh و همکاران، ۲۰۱۷)؛ فاصله از گسل (Arabameri و همکاران،



شکل ۴- نتایج حاصل از آزمون جکنايف برای تعیین مهمترین پارامترها (روش بیشینه آنتروپی)

وزن‌دهی دارد. مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی مثل روش بیشینه آنتروپی می‌باشد، با این تفاوت که ترتیب اثر آن‌ها فرق می‌کند و این مورد نشان‌دهنده دقت نظر متخصصان برای وزن‌دهی می‌باشد.

جدول ۳، نتایج حاصل از وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها در روش تحلیل سلسله مراتبی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول میزان اهمیت شیب با وزن ۰/۱۲۳ در پتانسیل آب زیرزمینی بسیار بالا می‌باشد. نرخ سازگاری کلیه معیارها (۰/۰۵) و زیرمعیارها (جدول ۵) نیز کمتر از ۰/۱ است که نشان از صحت

جدول ۳- وزن عوامل موثر در پتانسیل منابع آب زیرزمینی به روش AHP و مقادیر نرخ سازگاری

معیار	وزن	زیرمعیار	وزن	CR
انحنای دامنه	۰/۰۲۳	۲۳/۳۴ - ۱۰/۲	۰/۰۴۴	۰/۰۵
		۵/۱ تا ۱۰/۲	۰/۰۵۶	
		۱۰/۳ - ۵/۱	۰/۲۱	
		۱۵/۵ - ۱۰/۳	۰/۲۹	
ارتفاع	۰/۱۱۲	۲۶/۲۷ - ۱۵/۵	۰/۴	۰/۰۷
		۱۰۴۷-۷۶۹	۰/۰۸۸	
		۱۲۵۲-۱۰۴۷	۰/۱۷۵	
		۱۴۷۹-۱۲۵۲	۰/۳۳۵	
تراکم گسل	۰/۰۹۵	۱۹۰۰-۱۴۷۹	۰/۲۹۲	۰/۰۷
		۲۸۰۳-۱۹۰۰	۰/۱۱۰	
		۰/۰۹ - ۰	۰/۱۰	
		۰/۲۷ - ۰/۰۹	۰/۱۱	
تراکم آبراهه	۰/۰۹۳	۰/۴۴ - ۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۰۶
		۰/۶۴ - ۰/۴۴	۰/۲۷	
		۰/۹۵ - ۰/۶۴	۰/۳۱	
		۰/۱۱ - ۰/۲۷	۰/۲۳	
فاصله از گسل	۰/۱۱۱	۰/۴ - ۰/۲۷	۰/۲۰	۰/۰۴
		۰/۵۶ - ۰/۴	۰/۱۲	
		۰/۹۴ - ۰/۵۶	۰/۱۰	
		۱۳۹۴ - ۰	۰/۳۹	
فاصله از آبراهه	۰/۰۸۹	۳۱۵۵ - ۱۳۹۴	۰/۲۴	۰/۰۳
		۵۲۵۷ - ۳۱۵۵	۰/۱۹	
		۷۶۴۴ - ۵۲۵۷	۰/۱۰	
		۱۱۶۷۰ - ۷۶۴۴	۰/۰۸	
TWI	۰/۰۸۳	۹۴۴ - ۰	۰/۳۴	۰/۰۸
		۲۱۸۸ - ۹۴۴	۰/۲۸	
		۳۷۹۶ - ۲۱۸۸	۰/۲	
		۶۳۸۰ - ۳۷۹۶	۰/۱	
		۱۲۰۲۸ - ۶۳۸۰	۰/۰۸	
		۶/۱۹ - ۱/۵	۰/۱۰	
		۸ - ۶/۱۹	۰/۱۲	
		۱۱/۳ - ۸	۰/۲۱	
		۱۴/۸ - ۱۱/۳	۰/۲۶	
		۱۴/۸ - ۱۴	۰/۳۱	

ادامه جدول ۳- وزن عوامل موثر در پتانسیل منابع آب زیرزمینی به روش AHP و مقادیر نرخ سازگاری

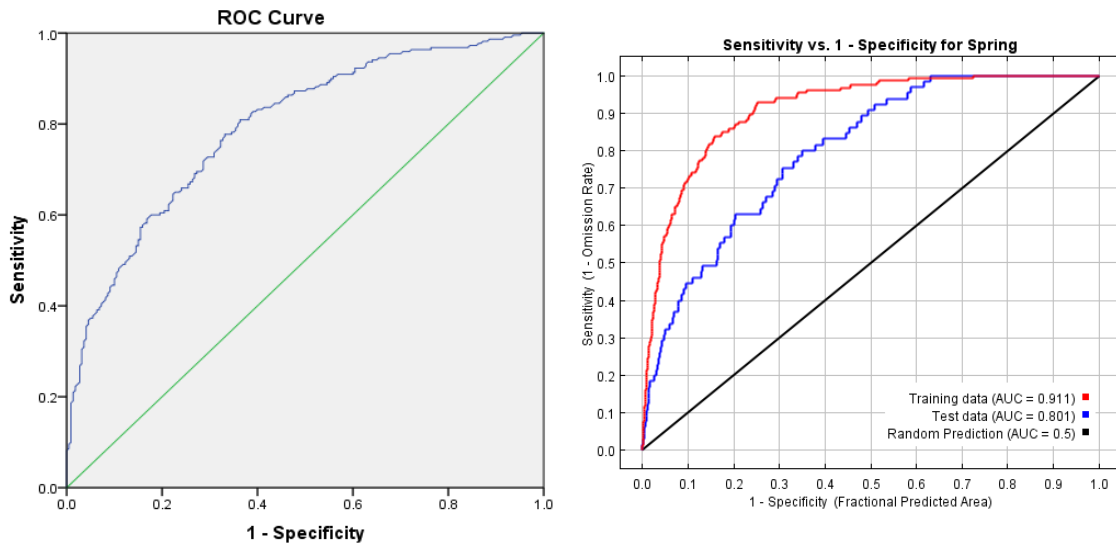
معیار	وزن	زیرمعیار	وزن	CR
TPI	۰/۰۷۴	۶۸/۶ - تا ۲۰/۲	۰/۳۷	۰/۰۹
		۲۰/۲ تا ۰/۵	۰/۲۸	
		۲۰ - ۰/۵	۰/۱۵	
		۴۰ - ۲۰	۰/۱۰	
شیب	۰/۱۲۳	۷۲/۹ - ۴۰	۰/۱۰	۰/۰۶
		۷/۹۸ - ۰	۰/۱۹	
		۱۸/۹۹ - ۷/۹۸	۰/۳۳	
		۳۶/۰۳ - ۱۸/۹۹	۰/۲۶	
جهت	۰/۰۱۱	۶۳/۱ - ۳۶/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۵۴
		۴۳۷ - ۶۳/۱	۰/۰۷	
		فلات	۰/۰۷	
		شمال	۰/۱۱	
		شمال شرقی	۰/۰۴	
		شرق	۰/۱۲	
		جنوب شرقی	۰/۰۸	
		جنوب	۰/۱۵	
کاربری اراضی	۰/۰۷۳	جنوب غربی	۰/۱۳	۰/۰۸
		غرب	۰/۲	
		شمال غربی	۰/۱	
		مراتع	۰/۴۹	
لیتولوژی	۰/۱۱۳	مناطق مسکونی	۰/۱۷	۰/۰۳
		کشاورزی	۰/۲۳	
		دیمزار	۰/۱۱	
		شیل و ماسه سنگ	۰/۱	
		رسوبات نازک مخروط افکنه‌ای و رسوبات تراس دره‌ای	۰/۰۹۵	
		سنگ آهک و دولومیت	۰/۱۶	
		مارن و ماسه سنگ	۰/۱۲	
		ماسه سنگ و کنگلومرا	۰/۲۲	۰/۰۳
		آندزیت آتشفشانی	۰/۱۳	
		آمفیبولیت	۰/۱۰۵	
		فلیش توربیدیته	۰/۰۷	

شکل ۶، نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی را بر اساس دو روش بیشینه آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل ۲۹/۶ درصد بر اساس روش بیشینه آنتروپی و ۳۴/۴ درصد حوضه بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی دارای پتانسیل آب زیرزمینی است. در این شکل هر چقدر به سمت عدد یک (رنگ آبی پررنگ) نزدیک می‌شود، پتانسیل آب زیرزمینی بیشتر است. لازم به ذکر است که انطباق بالایی بین هر دو روش تحلیل سلسله مراتبی مبتنی بر نظرات کارشناسی و

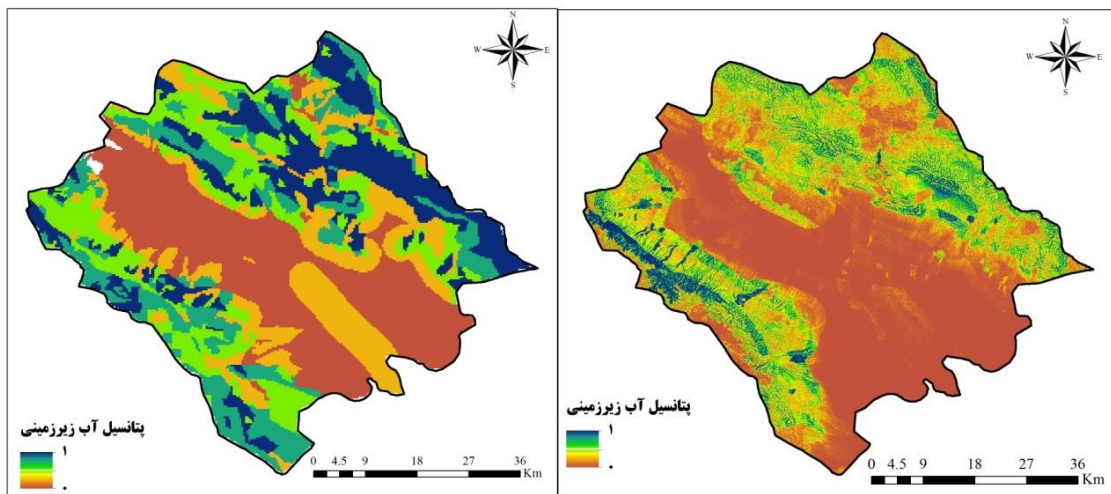
شکل ۵، منحنی ROC و مقدار AUC محاسبه شده برای ارزیابی عملکرد مدل MaxEnt (روش بیشینه آنتروپی) و روش تحلیل سلسله مراتبی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل دقت روش بیشینه آنتروپی در مرحله اعتبارسنجی ۸۰ درصد و روش تحلیل سلسله مراتبی ۷۳ درصد بوده است که نشان از برتری نسبی روش بیشینه آنتروپی است (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶؛ Yang و همکاران، ۲۰۱۳؛ Razandi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Razavi و همکاران، ۲۰۱۷).

دارای پتانسیل آب زیرزمینی است (Arulbalaji و همکاران، ۲۰۱۹؛ Deng و همکاران، ۲۰۱۶؛ Golkarian و Rahmati، ۲۰۱۸).

روش بیشینه آنتروپی مبتنی بر لایه‌های محیطی (برتری نسبی نسبت به روش AHP) وجود دارد و نشان‌دهنده دقت روش‌های مذکور برای تعیین مناطق



شکل ۵- منحنی ROC برای ارزیابی عملکرد مدل MaxEnt سمت راست و روش تحلیل سلسله مراتبی سمت چپ



شکل ۶- نقشه پتانسیل آب زیرزمینی، راست (روش بیشینه آنتروپی)، چپ (روش تحلیل سلسله مراتبی)

بهره‌برداری متناسب با پتانسیل آن در راستای اهداف توسعه پایدار یکی از راهکارهای مهم در این زمینه است. در این مطالعه، با در نظر گرفتن متغیرهای محیطی تاثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی شامل فاصله از گسل و تراکم گسل، سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، انحنا، شاخص رطوبت توپوگرافیک و شاخص موقعیت توپوگرافیک و با

### نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی با روش‌های سنتی هزینه‌بر و زمان‌بر است، تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشینی مثل بیشینه آنتروپی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مثل روش تحلیل سلسله مراتبی امری لازم و ضروری است. از طرف دیگر، مدیریت منابع آب زیرزمینی از طریق

پیشنهاد می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مدل MaxEnt و روش AHP توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی دارند و با توجه به سرعت و دقت بالای این دو روش پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های مشابه به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه به دلیل کمبود امکانات و منابع مالی و همچنین، زمان بر بودن اکتشاف آب‌های زیرزمینی با هدف بهره‌برداری مطمئن از این منابع مورد استفاده قرار بگیرند. بر اساس نتایج می‌توان گفت که پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش‌های پیشینه آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی دارای دقت قابل قبولی بوده است و در هزینه و زمان صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای را انجام داده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران برای مدیریت منابع آب زیرزمینی شهرستان تربت جام کمک کند.

#### سپاسگزاری

این مطالعه در قالب طرح تحقیقاتی مصوب و با حمایت معاونت پژوهشی مجتمع آموزش عالی شیروان انجام شده است که بدین‌وسیله از ایشان سپاسگزاری می‌شود.

استفاده از روش پیشینه آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حوزه آبخیز شهرستان تربت‌جام تهیه شد. نتایج نشان داد که عوامل ارتفاع، شیب، فاصله از گسل و سنگ‌شناسی در هر دو روش از مهمترین عوامل موثر بر پتانسیل آب زیرزمینی بوده‌اند و فقط ترتیب اهمیت آن‌ها با همدیگر تفاوت دارد. همچنین، نقشه نهایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در هر دو روش انطباق خوبی از نظر مناطق دارای پتانسیل و عدم پتانسیل دارند که نشان‌دهنده دقت روش‌های مذکور در تعیین پتانسیل آب است. دقت مدل‌سازی برای داده‌های آزمون و اعتبارسنجی در روش پیشینه آنتروپی به ترتیب ۰/۹۱۱ و ۰/۸۰۱ شد که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل در تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی است. همچنین، دقت روش تحلیل سلسله مراتبی نیز ۰/۷۳ شد که نشان‌دهنده دقت خوب روش بوده است. در نهایت، می‌توان گفت که ترکیب سامانه اطلاعات جغرافیایی با روش‌های پیشینه آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی به‌منظور تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه مثل ایران که دسترسی به اطلاعات و داده‌های ژئوفیزیکی با محدودیت زمان و هزینه مواجه هستند،

#### منابع مورد استفاده

1. Adiat, K.A., N.M. Nawawi and K. Abdullah. 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool: a case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, 440: 75-89.
2. Agarwal, R. and P.K. Garg. 2016. Remote sensing and GIS based groundwater potential and recharge zones mapping using multi criteria decision analysis making technique. *Water Resources Management*, 30: 243-260.
3. Al-Abadi, A., A. Al-Temmeme and A. Al-Ghanimy. 2016. A GIS-based combining of frequency ratio and index of entropy approaches for mapping groundwater availability zones at Badra-Al Al-Gharbi-Teeb areas, Iraq. *Water Resources Management*, 2(3): 265-283.
4. Arabameri, A.R., M. Sohrabi, K. Rezaei, M. Yamani and K. Shirani. 2018. Simulation of Najaf-Abad Watershed groundwater using data driven ensemble model EBF-Index of entropy. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(2): 25-48 (in Persian).
5. Arulbalaji, P., D. Padmalal and K. Sreelash. 2019. GIS and AHP techniques-based delineation of groundwater potential zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9: 20-42.
6. Deepa, S., S. Venkateswaran, R. Ayyandurai, R. Kannan and V. Prabhu. 2016. Groundwater recharges potential zones mapping in upper Manimuktha Sub-basin Vellar River India using GIS and remote sensing techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2: 137-149.
7. Deng, F., Z. Deng, D. Lv, D. Wang, H. Duan and Z. Xing. 2016. Application of remote sensing and GIS analysis in groundwater potential estimation in west Liaoning Province, China. *Journal of Engineering Research*, 4(3): 1-17.



8. Ghorbani Nejad, S., F. Falah, M. Daneshfar, A. Haghizadeh and O. Rahmati. 2017. Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models. *Geocarto International*, 32(2): 167–187.
9. Golkarian, A. and O. Rahmati. 2018. Use of a maximum entropy model to identify the key factors that influence groundwater availability on the Gonabad Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77: 369-389.
10. Golkarian, A., S.A. Naghibi, B. Kalantar and B. Pradhan. 2018. Groundwater potential mapping using C5.0, random forest and multivariate adaptive regression spline models in GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190: 149-168.
11. Guo-Liang, D., Z. Shuang, I. Javed and Y. Xin. 2017. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang Watershed, Gansu Province, China. *Journal of Mountain Science*, 14(2): 249-268.
12. Haghizade, A., D. Moghaddam and H. Pourghasemi. 2017. GIS-based bivariate statistical techniques for groundwater potential analysis (an example of Iran). *Journal of Earth System Science*, 126: 109-135.
13. Jothibas, A. and S. Anbazhagan. 2016. Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River Basin of South India using Analytic Hierarchy Process, Model. *Earth Systems and Environment*, 2: 109-132.
14. Kazemi, R., S. Shadfar and R. Bayat. 2016. Investigation of the effective elements in water resource exploration of the hard formations, case study: Lar Catchment. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 7(4): 389-401 (in Persian).
15. Kordestani, M.D., S.A. Naghibi, H. Hashemi, K. Ahmadi, B. Kalantar and B. Pradhan. 2018. Groundwater potential mapping using a novel data-mining ensemble model. *Hydrogeology*, 27: 1–14.
16. Lee, S., Y. Hyun and M. Lee. 2019. Groundwater potential mapping using data mining models of big data analysis in Goyang-Si, South Korea. *Sustainability*, 11: 16-28.
17. Manap, M.A., N.A. Sulaiman, M.F. Ramli, B. Pradhan and N. Surip. 2013. A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 1621–1637.
18. Mokarram, M., G. Roshan and S. Negahban. 2015. Landform classification using topography position index, case study: salt dome of Korsia-Darab Plain, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1: 40-59.
19. Mousavi, S.M., A. Golkarian, S.A. Naghibi, B. Kalantar and B. Pradhan. 2017. GIS-based groundwater spring potential mapping using data mining boosted regression tree and probabilistic frequency ratio models in Iran. *AIMS Geosciences*, 3: 91–115.
20. Naghibi, S.A., H.R. Pourghasemi and K. Abbaspour. 2018. A comparison between ten advanced and soft computing models for groundwater qanat potential assessment in Iran using RS and GIS. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3–4): 967–984.
21. Naghibi, S.A., H.R. Pourghasemi, Z.S. Pourtaghie and A. Rezaei. 2014. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan Watershed, Iran. *Earth System Sciences*, 8(1): 171-186.
22. Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190: 231–259.
23. Rahimi, M. and K. Solaimani. 2017. Remote sensing and GIS-based assessment groundwater potential zones mapping using multi-criteria decision-making technique. *Iran Watershed Management Science and Engineering*, 10(35): 27-38 (in Persian).
24. Rahmati, O., A. Nazari Samani, M. Mahdavi, H.R. Pourghasemi and H. Zeinivand. 2015. Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 7059–7071.
25. Rahmati, O., H.R. Pourghasemi and A.M. Melesse. 2016. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping, a case study at Mehran region, Iran. *Catena*, 137: 360–372.
26. Razandi, Y., H.R. Pourghasemi, N. Samani Neisani and O. Rahmati. 2015. Application of analytical hierarchy process, frequency ratio and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Science Informatics*, 8(4): 867-883.
27. Razavi, V., M. Mesgari and K. Kazemi. 2017. Evaluation and comparison of frequency ratio, statistic index and entropy methods for groundwater potential mapping using GIS, case study: Jahrom Township. *Journal of Ecohydrology*, 4(3): 725-736 (in Persian).
28. Saaty, T.L. 1980. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw Hill, New York, 287 pages.

29. Sahoo, S., S.B. Munusamy, A. Dhar, A. Kar and P. Ram. 2017. Appraising the accuracy of multi-class frequency ratio and weights of evidence method for delineation of regional groundwater potential zones in canal command system. *Water Resources Management*, 31: 4399-4413.
30. Saraf, A. and P.R. Chaudhary. 2005. Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharges sites. *International Journal of Remote Sensing*, 19(10): 1825-1841.
31. Sener, E., S. Sener and A. Davraz. 2018. Groundwater potential mapping by combining fuzzy analytic hierarchy process and GIS in Beysehir Lake Basin, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 1-21.
32. Tehrany, M.S., B. Pradhan and M.N. Jebur. 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based Decision Tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, 504: 69-79.
33. Thilagavathi, N., T. Subramani, M. Suresh and D. Karunanidhi. 2015. Mapping of groundwater potential zones in Salem Chalk Hills, Tamil Nadu, India, using Remote Sensing and GIS techniques. *Environment Monitoring Assessment*, 187(164): 1-17.
34. Yang, X.Q., S.P.S. Kushwaha, S. Saran, J. Xu and P.S. Roy. 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Journal of Ecological Engineering*, 51: 83-87.
35. Yeh, H.F., Y.S. Cheng, H. Lin and C. Lee. 2016. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, 26: 33-43.
36. Zabihi, M., H.R. Pourghasemi and M. Behzadfar. 2015. Groundwater potential mapping using Shannon's entropy and random forest models in the Bojnourd Township. *Journal of Ecohydrology*, 2(2): 221-232 (in Persian).