



مدل‌سازی فضایی توان آب زیرزمینی با استفاده از تلفیق روش آنتروپی بیشینه و روش جنگل تصادفی در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز قوریچای اردبیل

جعفر جعفرزاده^۱، میثم ارگانی^۲

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه سنجش از دور و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

چکیده

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. هدف از این پژوهش شناسایی مناطقی است که توان آب زیرزمینی دارند و اولویت‌بندی عوامل موثر بر آن هست. در این پژوهش ۱۱ شاخص تأثیرگذار بر توان آب زیرزمینی شامل شیب، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از آب‌راه، تراکم زه‌کشی، فاصله از گسل، شاخص رطوبت پستی و بلندی، موقعیت پستی و بلندی، سنگ‌شناسی، کاربری زمین و موقعیت شیب نسبی به کار برده شد. به روش تصادفی ۳۰ درصد از مجموع ۵۸ چشمه در گروه داده‌های اعتبارسنجی و ۷۰ درصد آن در گروه داده‌های آموزش گذاشته شد. برای اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر و پهنه‌بندی توان آب زیرزمینی در آبریز قوریچای، روش جنگل تصادفی ارتقاء یافته با بیشینه آنتروپی با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی به کار برده شد و برای ارزیابی مدل منحنی تشخیص عمل کرد نسبی (ROC) و سطح زیر منحنی (UC) به کار برده شد. نتیجه نشان داد که توان آب زیرزمینی در حدود هشت درصد حوضه‌ی آبریز، بیش‌تر در خروجی حوضه است. بر اساس نمودار VIP لایه TWI با مقدار ۰/۳۲۹ و لایه‌ی فاصله از رودخانه با مقدار ۰/۱۷۵ به ترتیب بیش‌ترین و کمترین عامل‌های تأثیرگذار بر توان آب زیرزمینی با مقادیر بود. سطح زیر منحنی AUC نشان‌دهنده‌ی دقت ۸۷ درصدی در مرحله‌ی آموزش برای شناخت منطقه‌های دارای توان آب زیرزمینی بود. نتیجه‌ی این پژوهش می‌تواند در مدیریت آب زیرزمینی در حوضه‌ی آبریز قوریچای در رابطه با افزایش جمعیت و همچنین گسترش ساخت و ساز انسانی و توسعه‌ی کشاورزی منطقه به کار برده شود.

کلمات کلیدی: آب‌های زیرزمینی، جنگل تصادفی، پهنه‌بندی، مدل‌سازی فضایی، سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، آنتروپی بیشینه، حوضه‌ی آبریز قوریچای.

۱- مقدمه

رشد جمعیت نیاز روزافزون به غذا و آب را افزایش می‌دهد و در نتیجه تقاضای آب در سراسر جهان افزایش می‌یابد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که منابع آب سطحی به دلیل شرایط اقلیمی محدود است، نیاز آب از طریق آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود (اوه^۱ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۶۳؛ وادا و همکاران^۲، ۲۰۱۰: ۲). آب‌های زیرزمینی یکی از منابع اصلی مصرف در جنبه‌های مختلف نیازهای بشری به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (موخرجی و همکاران^۳، ۲۰۱۲: ۲۶۵۰). دسترسی محدود به منابع آب سطحی در این مناطق منجر به بهره برداری بیشتر از تغذیه می‌شود که باعث افزایش سطح تنش در سفره‌های زیرزمینی می‌شود (گلیسون و همکاران^۴، ۲۰۱۱: ۳۸۳). بنابراین، بررسی رابطه بین منابع آب زیرزمینی و آب شیرین و آب‌های احیا شده برای تأمین نیازهای تأمین و تقاضای آب مهم است (چاودوری و همکاران^۵، ۲۰۱۰: ۱۲۱۲؛ کوندزوایش و همکاران^۶، ۲۰۰۸: ۶). آب از دیرباز و از بدو پیدایش حیات نقش اساسی در ادامه‌ی زندگی و طبیعتاً موجودیت انسان ایفا کرده است. در طول تاریخ، آب عامل مهمی در شکل دادن به روش زندگی بشر و توسعه فناوری، زبان و فرهنگ بوده است. انسان به طرق مختلف با انجام فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و... به راحتی، آب این نعمت مقدس خداوندی را آلوده می‌نماید و با گذشت زمان مخازن آب سالم و گوارا به تدریج آلوده شده و شاهد تنزل کیفیت آب به خصوص منابع محدود آب شیرین هستیم. آب به عنوان یکی از اساسی‌ترین نیازهای بشر همیشه به دلیل خشکسالی‌ها و تغییرات اقلیمی، زندگی بشر و موجودات زنده را با بحران‌های جدی مواجه ساخته و خواهد ساخت. بحران آب چالشی است که به صورت مکرر و در هر آب و هوایی احتمال وقوع آن می‌رود (مسعودیان و کاویانی، ۱۳۸۶: ۸۵). افزایش روزافزون جمعیت و نیاز به گسترش صنعت و کشاورزی از طرفی و ارتقای سطح استانداردهای زندگی در بسیاری از کشورها از طرف دیگر موجب افزایش نیاز به منابع آب با کیفیت و همچنین کمیت مناسب برای مصارف مختلف کشاورزی، صنعت و شرب شده است. علاوه بر این واقع شدن کشورمان ایران بر روی کمربند خشک جهانی (علیزاده، ۱۳۸۹: ۱۴۰)، ایجاد شرایط سینوپتیکی و محدودیت منابع آبی، همواره پدیده‌ی بحران آب را با عنوان یک واقعیت در کشور ما رقم زده است. راهکارهای مناسب برای مدیریت بحران ناشی از آب و همچنین سازگاری با مسئله کمبود آب، مستلزم شناخت و آگاهی از چگونگی وقوع و تهدیدهای ناشی از آن بر منابع آب موجود خواهد بود. پژوهشگران مختلف روش‌های متفاوتی را برای توان یابی آب زیرزمینی به کار برده‌اند که می‌توان به روش‌های تحلیل سلسله مراتبی (آرولبالاجی و همکاران^۷، ۲۰۱۹: ۳) درخت وایازی

1-Oh et al.
 2-Wada et al.
 3-Mukherjee et al.
 4-Gleeson et al.

5-Chowdhury et al.
 6-Kundzewicz et al.
 7-Arulbalaji et al.

رگرسیون تقویت شده (موسوی و همکاران^۱، ۲۰۱۷: ۴۵۲)، جنگل تصادفی (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۲۲)، شاخص هم‌پوشانی وزنی (ساهو و همکاران^۲، ۲۰۱۷: ۴۴۰۶)، بیشینه‌ی آنتروپی (رزندی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۱۴)، نسبت فراوانی (موسوی و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۵۵؛ لی و همکاران^۳، ۲۰۱۹: ۱۶۷۱)، وایازی پشتیبانی (گولی‌انگ و همکاران^۴، ۲۰۱۷: ۲۶۴)، شاخص آماری (رضوی و همکاران، ۱۳۹۶: ۷۴۰) و ماشین بردار پشتیبان (لی و همکاران، ۲۰۱۸: ۸۵۷) اشاره کرد. رحمتی و همکاران^۵ (۲۰۱۶) در پژوهشی به بررسی کاربرد مدل‌های جنگل تصادفی مبتنی بر داده‌های مبتنی بر GIS و حداکثر آنتروپی برای نقشه‌برداری پتانسیل آب‌های زیرزمینی در منطقه مهران استان ایلام پرداختند. در تحقیقی به بررسی مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر توان آب زیرزمینی در آبریز پیرانشهر (آذربایجان غربی) با مدل MaxEnt و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی پرداخته شد. در این پژوهش، برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر و پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در آبریز پیرانشهر روش بیشینه‌ی آنتروپی و مدل MaxEnt را با بهره‌گیری از ArcGIS، به کار برده شد و برای ارزیابی کردن مدل منحنی تشخیص عمل کرد نسبی (ROC^۶) را استفاده شد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که توان آب زیرزمینی در ۳۳/۶ درصد حوضه‌ی آبریز، بیش‌تر در مرکز آبریز، است. بر اساس نمودار جکنایف لایه‌های شاخص رطوبت پستی و بلندی، ارتفاع، سنگ‌شناسی (ماسه سنگ و پلمه سنگ)، سختی پستی و بلندی، موقعیت پستی و بلندی و شیب به ترتیب مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار بر توان آب زیرزمینی بود (تیموری و همکاران، ۱۳۹۹: ۶۸). در پژوهشی تجزیه و تحلیل پتانسیل آب زیرزمینی منطقه‌ای با استفاده از درخت تصمیم‌گیری طبقه‌بندی و رگرسیون در حوضه‌ی آبریز فیروز واقع در استان خراسان شمالی انجام شد. در تحقیق از مدل‌های درخت تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی برای پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی این حوضه استفاده شد و با به کارگیری دوازده شاخص، نقشه‌ی نهایی را استخراج گردید. نتایج تحقیق که با استفاده از الگوریتم CART انجام شد، دقت پیش‌بینی ۸۸ درصدی را نشان می‌دهد (چوبین و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۹۶). در پژوهشی ارزیابی مناسب بودن سایت تغذیه‌ی آبخوان مدیریت شده با استفاده مدل‌سازی با مدل MAR و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی در حوضه‌ی آبریز پاچارو در کالیفرنیا انجام شد. نتایج کار نشان داد که چگونه تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی ترکیبی GIS می‌تواند به برنامه‌ریزی تأمین آب منطقه‌ای، از جمله ارزیابی گزینه‌ها برای افزایش منابع آب زیرزمینی کمک کرد (روسو و همکاران^۷، ۲۰۱۴: ۳۹۷). در پژوهشی ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی برای تهیه‌ی نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در شهرستان جهرم انجام شد. در این تحقیق دوازده معیار هیدرولوژی، زمین‌شناسی و جغرافیای طبیعی که بر موقعیت چشمه‌ها اثر

1-Mousavi et al.
2-Sahoo et al.
3-Lee et al.
4-Guo-Liang et al.

5-Rashmati et al.
6-Receiver Operating Characteristic
7-Russo et al.

می‌گذارند را در نظر گرفته شد. نوآوری تحقیق در به کارگیری روش شاخص آماری برای اولین بار به منظور تهیه نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی و مقایسه‌ی آن با دو روش آنتروپی و نسبت فراوانی بوده است. نتایج این ارزیابی نشان‌دهنده‌ی دقت عالی برای این سه مدل و برتری مدل آنتروپی نسبت به دو مدل دیگر است. همچنین بر اساس مدل آنتروپی لایه‌های شاخص توان آبراهه، ارتفاع، شیب و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه‌ی مطالعه داشته است (رضوی ترمه و همکاران، ۱۳۹۱: ۷۳۰).

در پژوهشی دیگر پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از نقاط چشمه در شهرستان بیرجند ارزیابی شد. در تحقیق از روش‌های نسبت فراوانی، وزن واقعه و رگرسیون لجستیک در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است. در این پژوهش روش نسبت فراوانی بهترین عملکرد را در این خصوص داشته است (پورتقی و پورقاسمی^۱، ۲۰۱۴: ۶۵۰). در پژوهشی با استفاده از روش ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس فازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقاط دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی در دشت سیلاخور را تعیین گردید. بر این اساس نقاط دارای پتانسیل زیاد تا متوسط بیشتر در مرکز و جنوب غربی دشت قرار گرفته و منطبق بر نواحی آبرفت‌های کواترنری و سازندهای سخت کربناته می‌باشد. اعتبارسنجی توسط تعداد چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه انجام شد که نتایج بدست آمده بیانگر آن است که، استفاده از رویکرد تلفیقی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس فازی در پتانسیل‌یابی با موقعیت چاه‌ها همخوانی خوبی دارد، به طوری که حدود ۸۷٪ از چاه‌های بهره‌برداری در مناطقی با پتانسیل آب زیرزمینی متوسط تا زیاد قرار گرفته است (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۴۱). در پژوهشی دیگر با استفاده از مدل نسبت فراوانی تلاش گردیده تا مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی حوضه‌ی آبخیز صوفی چای مشخص گردد. با استفاده از GIS تحلیل‌های لازم بر روی فاکتورها و نقشه‌ها صورت گرفت و نقشه‌ها همپوشانی شدند. در نهایت با استفاده از خروجی مدل، نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی ایجاد گردید. همچنین نتایج این منحنی نشان داد که ۸۰٪ درصد این مدل کارایی خوبی در پتانسیل منابع آب زیرزمینی منطقه دارد. بر این اساس با استفاده از این مدل درصد مساحت‌ها به این صورت می‌باشد: ۶۳ درصد از مناطق کم، ۱۸ درصد متوسط، ۱۲ درصد خوب و ۷ درصد خیلی خوب می‌باشد (بیابانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۴۳).

در پژوهش حاضر، توان آب زیرزمینی در سطح حوضه‌ی آبریز قوریچای مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به وسعت زیاد منطقه، حاکمیت شرایط اقلیمی نیمه‌خشک و وجود سکونتگاه‌های پرشمار در منطقه، می‌توان به اهمیت بررسی توان آب زیرزمینی در سطح حوضه‌ی آبریز قوریچای پی برد. این امر به ویژه در رابطه با وجود سکونتگاه‌های انسانی زیاد، وجود اراضی کشاورزی گسترده و حفاظت منابع آب و خاک از اهمیت قابل توجهی

برخوردار می‌باشد. هدف از این پژوهش، توان‌سنجی آب زیرزمینی حوضه آبریز قوریچای واقع در استان اردبیل می‌باشد که با به کارگیری روش الگوریتم جنگل تصادفی ارتقاء یافته با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R و به کارگیری نرم‌افزارهای تخصصی سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی مانند ArcGIS و SAGA نقشه‌ی نهایی توان آب زیرزمینی این منطقه تهیه شد. در این پژوهش، الگوریتم جنگل تصادفی در نرم‌افزار برنامه‌نویسی R ارتقا یافت. به این صورت که این روش با روش بیشینه آنتروپی^۱ تلفیق شد و نتیجه کار منجر به افزایش دقت مدل شد. دقت نهایی مدل استفاده شده در این تحقیق بر اساس شاخص‌های اعتبارسنجی حدود ۸۷ درصد شد که تقریباً دقت بسیار خوبی می‌تواند در این نوع تحقیقات باشد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

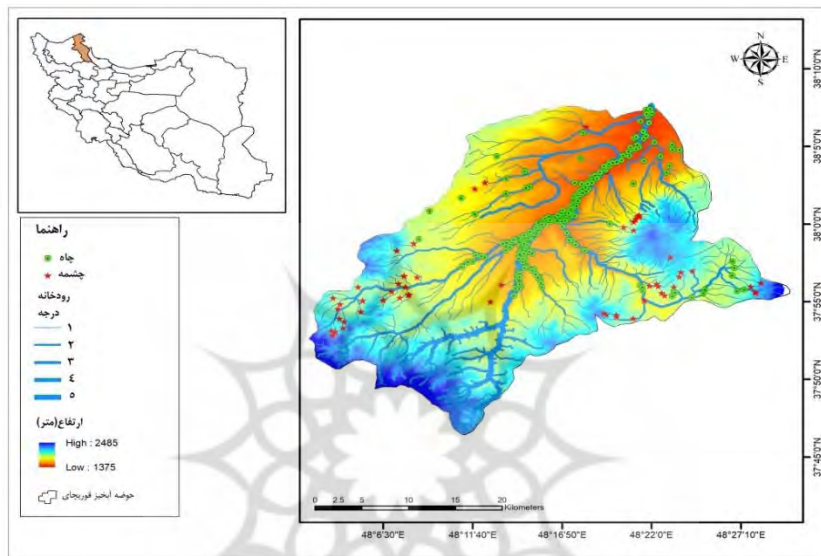
حوضه‌ی آبریز قوریچای بخشی از زیرحوضه‌ی قره‌سو از حوضه‌ی اصلی ارس می‌باشد که در فاصله‌ی ۵ کیلومتری شهرستان اردبیل واقع شده است. حوضه‌ی آبریز قوریچایی در جنوب شهرستان نیر واقع در استان اردبیل در حدوده‌ی مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی واقع گردیده است و مساحت کل حوضه برابر ۷۹۸۴۲ هکتار و ارتفاع متوسط آن براساس نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاعی ۱۷۵۲ متر از سطح دریا می‌باشد. این حوضه از شمال به شهرستان نیر، از شرق به اردبیل، از جنوب به شهرستان کوثر و از غرب به شهرستان میانه استان آذربایجان شرقی متصل می‌باشد (رستم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۶). حوضه‌ی قوریچای دارای دو سرشاخه‌ی اصلی گروچای و کوراییم چای است. این رودخانه‌ها در نهایت رودخانه‌ی اصلی قوریچای را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). در سطح حوضه‌ی آبریز قوریچای ۷۵ نقطه روستایی و یک نقطه شهری (کورائیم) وجود دارد. اکثر این سکونتگاه‌ها در داخل دره‌های حوضه‌ی آبریز و مجاورت آبراهه‌های اصلی مستقر شده‌اند (مددی و همکاران، ۱۳۹۹: ۸۵).

برای شناسایی منطقه‌های دارای توان آب زیرزمینی و بر اساس مرور برخی منابع (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۷: ۴۰؛ فیلیپس و همکاران^۲، ۲۰۰۶: ۲۵۴؛ نقیبی و همکاران^۳، ۲۰۱۸: ۹۸۰؛ لی و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۶۷۰) در این زمینه ۱۱ شاخص تأثیرگذار بر آب زیرزمینی شامل شیب، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از آبراه، تراکم زهکشی، اصله از گسل، شاخص رطوبت پستی و بلندی (TWI^۴) سنگ‌شناسی، کاربری زمین، موقعیت شیب نسبی

1-Maximum Entropy
2-Phillips et al.

3-Naghbi et al.
4-Topographic Wetness Index

(RSP^۱)، شاخص موقعیت پستی و بلندی (TPI^۲) به کار برده شد (جدول ۱).



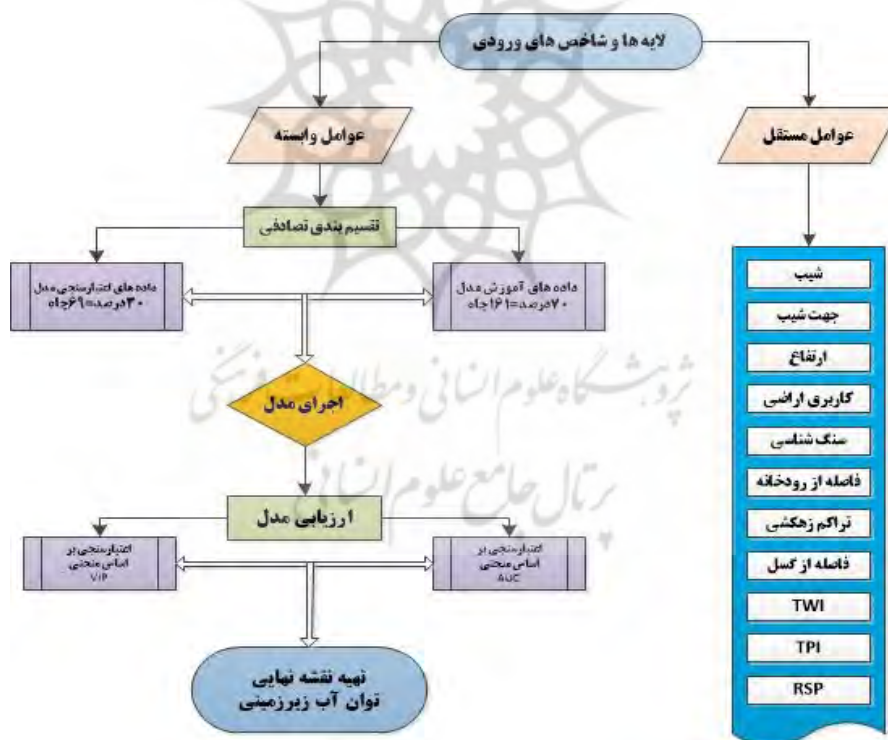
شکل (۱): موقعیت منطقه‌ی (محدوده) مورد مطالعه
 Fig (1): The study area

جدول (۱): شاخص‌های به کاررفته برای شناسایی مناطق دارای توان آب زیرزمینی
 Table (1): Indicators used to identify areas with groundwater potentia.

روش تهیه	شاخص (متغیر)
بر اساس مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار ArcGIS	شیب، جهت شیب
بر اساس تصویر رادار SRTM	مدل رقومی ارتفاع
تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS	فاصله از آبراهه و فاصله از گسل
تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS	تراکم آبراهه
بر اساس نقشه‌ی زمین‌شناسی	سنگ‌شناسی
نقشه‌ی کاربری اراضی	کاربری اراضی
بر اساس مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار SAGA GIS	TRI و TWI, RSP, TPI

در این تحقیق از اطلاعات چاه‌های نیمه‌عمیق موجود در داخل حوضه‌ی آبریز که ۲۳۰ حلقه چاه می‌باشد و اطلاعات این چاه‌ها از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ شده است، به عنوان عامل وابسته استفاده شده است. از ۲۳۰ چاه موجود، به روش تصادفی ۶۹ چاه (۳۰٪) برای داده‌های اعتبارسنجی و ۱۶۱ چاه (۷۰٪) برای

داده‌های آموزش طبقه‌بندی شد. برای تولید لایه‌ی رقومی ارتفاعی از تصویر رادار SRTM استفاده شد. لایه‌های ارتفاعی باعث ایجاد شرایط اقلیمی متفاوت و در نتیجه تولید خاک و پوشش گیاهی مختلفی می‌شود (جوتیباسو و آنبازگان، ۲۰۱۶: ۶). لایه‌های شیب، جهت شیب و انحنای پستی و بلندی مربوط به شاخص‌های سطح هستند. این لایه‌ها با مدل رقومی ارتفاع و به ترتیب از توابع شیب، جهت شیب و انحنای تولید شده‌اند. افزایش شیب زمین باعث کاهش میزان آب نفوذ کرده به زمین و افزایش رواناب می‌شود (دنگ و همکاران^۲، ۲۰۱۶: ۱۰؛ تیموری و همکاران، ۱۳۹۹: ۶۵). مراحل اصلی پژوهش به ترتیب عبارت است از: (۱) توصیف داده‌ها، (۲) معرفی مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی، (۳) تجزیه و تحلیل حساسیت (SA) و (۴) ارزیابی عملکرد مدل. شکل ۲ روندنمای روش‌شناسی این مطالعه را نشان می‌دهد (شکل ۲).



شکل (۲): روندنمای انجام تحقیق
 Figure (2): Research process

۲-۲- عوامل مورد استفاده در شناسایی مناطق دارای توان آب زیرزمینی

فاصله از آب راه و فاصله از گسل نقش مهمی در توان آب‌های زیرزمینی دارد. لایه‌های تراکم آبراه و تراکم گسل با نقشه‌ی آبراه‌ها، از طریق تجزیه و تحلیل لایه‌ی رقومی ارتفاع در نرم‌افزار ArcGIS استخراج شد. شاخص‌های TPI، TRI، TWI، RSP بر اساس مدل رقومی ارتفاعی و در نرم‌افزار GIS SAGA استخراج و تولید شد. شاخص TWI (رابطه‌ی ۱) تأثیر پستی و بلندی را بر تولید رواناب به صورت کمی نشان می‌دهد و مکان منطقه‌های اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند که نشان‌دهنده‌ی نفوذ آب زیرزمینی ناشی از تأثیر پستی و بلندی است (آرولبالاجی و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۲). شاخص RSP هم نشان‌دهنده‌ی موقعیت شیب هر سلول و موقعیت نسبی آن بین کف دره تا خط‌الراس است (رابطه‌ی ۲). شاخص TPI ارتفاع هر یک از سلول‌ها را در مدل رقومی ارتفاع با ارتفاع متوسط محدوده مشخص شده در اطراف این سلول مقایسه می‌کند. این شاخص تفاوت بین نقطه تصویر مرکزی و میانگین سلول‌های اطراف را نشان می‌دهد (رابطه‌ی ۳). شاخص TRI میزان تفاوت ارتفاع بین سلول‌های مجاور در یک مدل رقومی ارتفاعی را نشان می‌دهد. این شاخص بیانگر تغییر در سطح پستی و بلندی بر اثر افزایش فرسایش در سطح حوضه‌ی آبریز است (رابطه‌ی ۴).

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

که در این رابطه، A_s برابر است با مساحت منطقه مشارکت‌کننده در بالادست سلول و β معادل شیب پستی و بلندی است.

$$RSP = \left(\frac{Z(s) - Z(s)_v}{Z(s)_r - Z(s)_v} \right) \times 100 + 0.5 \quad (2)$$

$$TPI = Z_0 - \frac{\sum 1-nZ_n}{n} \quad (3)$$

که در این رابطه، Z_0 برابر است با ارتفاع نقطه‌ی ارزیابی شده؛ Z_n برابر است با ارتفاع شبکه‌ی اطراف نقطه‌ی ارزیابی شده و n برابر است با تعداد کل نقطه‌های به کاررفته در ارزیابی.

$$TRI = \left(\sum (Z_c - Z_i)^2 \right)^2 \quad (4)$$

که در این رابطه، Z_c برابر است با ارتفاع سلول مرکزی و Z_i ارتفاع یکی از هشت سلول همسایه‌ی سلول مرکزی است. جدول ۲، مشخصات و ویژگی‌های لایه سنگ‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه را نمایش می‌دهد (جدول ۲).

جدول (۲): چینه‌بندی لیتولوژی حوضه‌ی آبریز قوریچای
Table (2): Lithology stratification of Ghorichay catchment

مساحت (Km ²)	سن	توضیحات	واحد
228.8328	Middle.Eocene	Andesitic volcanics	Eviv
56.30719	Quaternary	Low level piedment fan and vally terrace deposits	Qt2
180.7915	Miocene	Dacitic to andesitic subvolcanic rocks	Mvai
225.4475	Pliocene	Marl, shale, sandstone and conglomerate	Plms
1.163858	Miocene	Red marl, gypsiferous marl, sandstone and conglomerate	URig
8.009966	Quaternary	High level piedmont fan and vally terrace deposits	Qt1
12.78166	Pliocene	Marl, shale, sandstone and conglomerate	Plms
22.29639	Pliocene	Marl, shale, sandstone and conglomerate	Plms
3.954169	Miocene	Dacitic to andesitic subvolcanic rocks	Mvai
35.74622	Miocene	Marl, calcareous sandstone, sandy limestone and minor cong	Msm
23.67846	Miocene	Dacitic to andesitic subvolcanic rocks	Mvai
2.325434	Pliocene	Marl, shale, sandstone and conglomerate	Plms

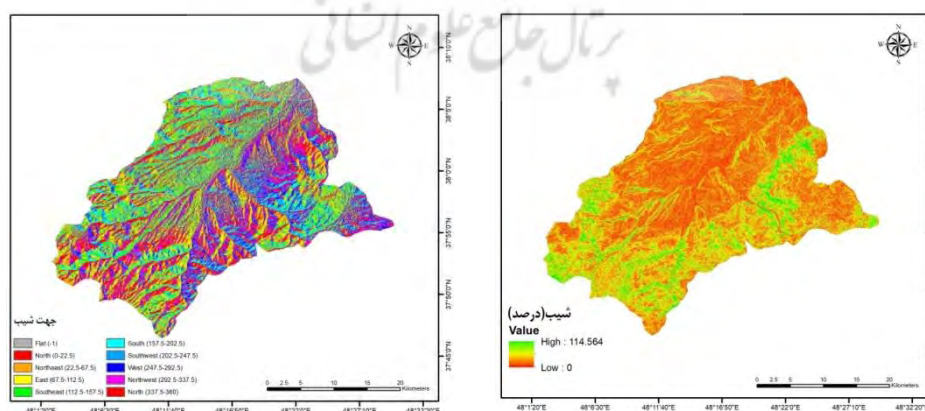
۲-۳- روش بیشینه آنتروپی

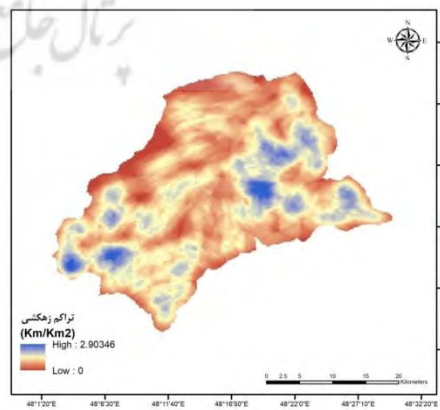
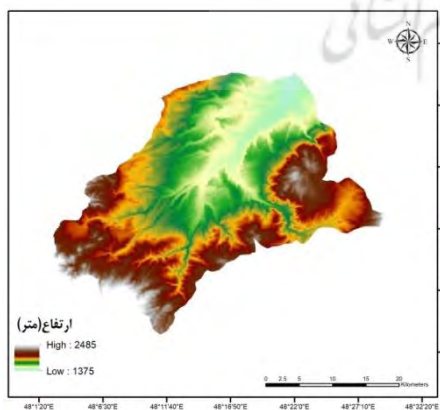
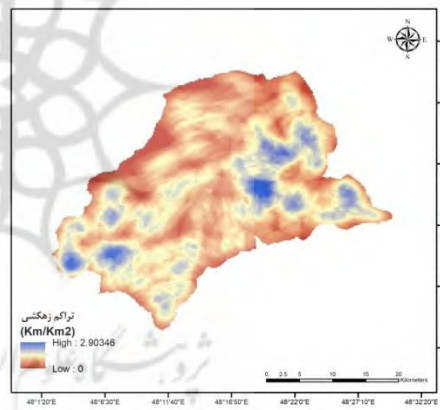
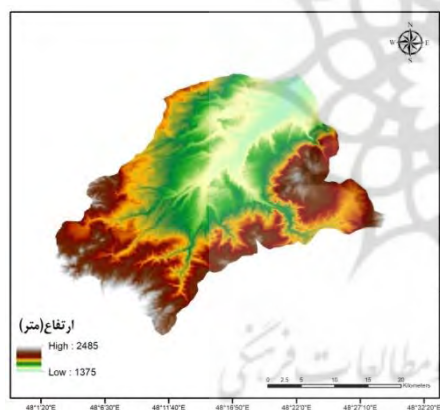
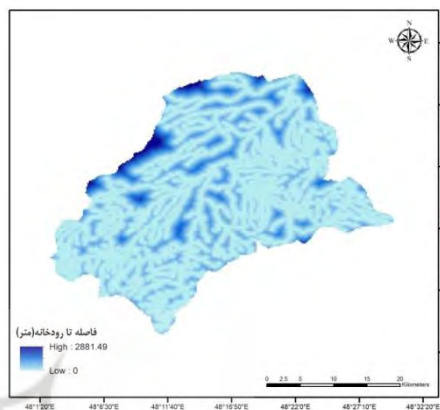
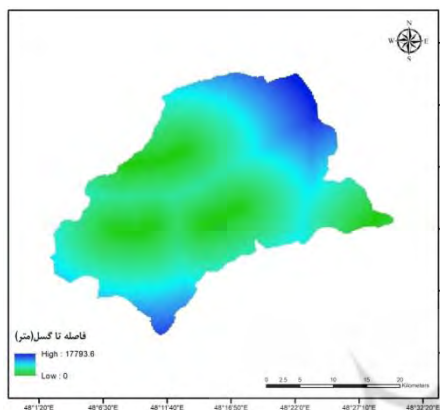
روش بیشینه‌ی آنتروپی یا حداکثر بی‌نظمی، یکی از روش‌های یادگیری مبتنی بر ماشین بوده و روشی برای برآورد مقدار احتمال است که در سال‌های اخیر به صورت گسترده‌ای در رشته‌های مربوط به منابع طبیعی به کار رفته است. این روش مبتنی بر نقطه‌های بود است (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۳۶). تیموری و اسدی (۱۳۹۹: ۵۷) در مورد این روش اظهار داشته‌اند: در این روش همبستگی سنج‌های مؤثر بر آب زیرزمینی با نقطه‌های بود (چشمه‌ها) محاسبه و با همبستگی متغیرها با ۱۰۰۰۰ نقطه‌ی تصادفی از منطقه (نقطه‌های شبه نبود) مقایسه کرده می‌شود. ارزیابی کردن این مدل با منحنی ROC امکان‌پذیر است، که در آن احتمال تشخیص دادن صحیح نقطه‌های بود مدل با احتمال تشخیص صحیح نقطه‌های شبه نبود مقایسه کرده می‌شود و سطح زیر نمودار AUC به دست آمده معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقطه‌های بود و نبود دانسته می‌شود (تیموری و همکاران، ۱۳۹۹: ۵۸؛ فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۴۰). یکی از مهم‌ترین مزیت‌های مدل تلفیقی

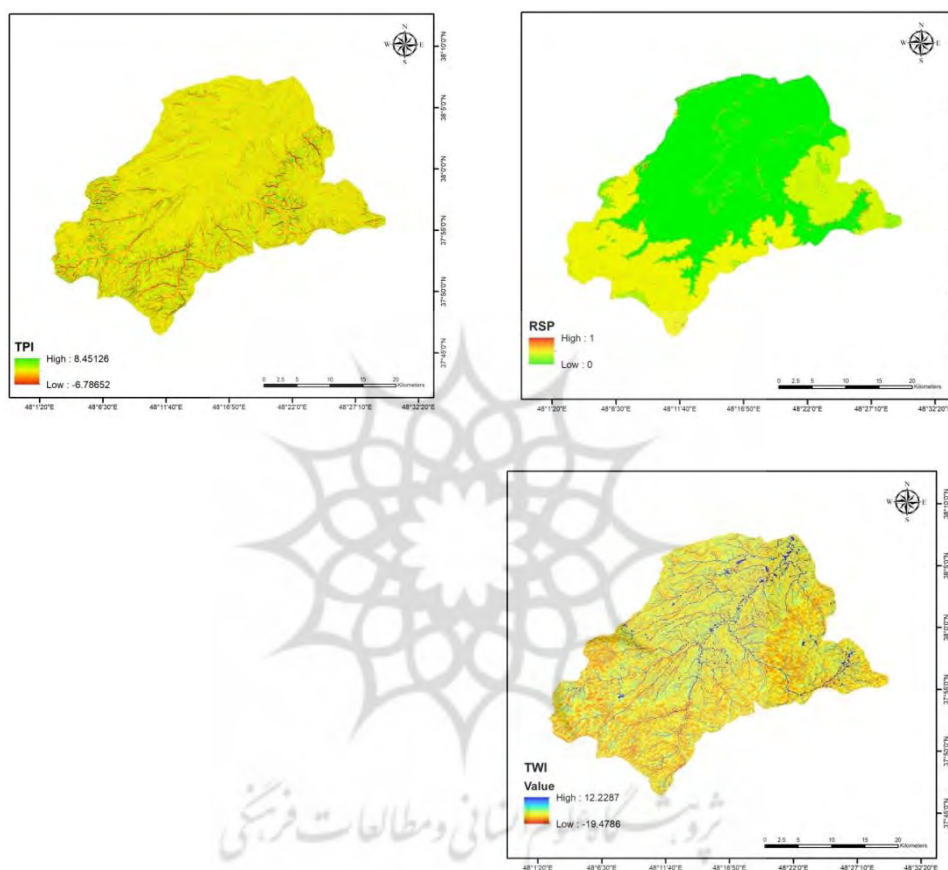
بیشینه آنتروپی با جنگل تصادفی که در این تحقیق به کار گرفته شده است، توانایی شناسایی کردن مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تحلیل کردن حساسیت متغیرها با روش جکنایف است بعد از تلفیق کردن همه‌ی نقشه‌ها با یک دیگر نقشه‌ی نهایی توان آب زیرزمینی تهیه، و عامل‌های مؤثر بر آن شناسایی کرده شد.

۳- یافته‌ها و بحث

شکل ۳ لایه‌های به کار رفته برای بررسی پتانسیل توان آب زیرزمینی حوضه‌ی آبریز مورد مطالعه را نشان می‌دهد. دامنه‌ی تغییرات ارتفاع منطقه‌ی مورد مطالعه بین ۱۳۷۵ تا ۲۴۸۵ متر از تراز دریا متغیر است و ارتفاع از شمال شرق به جنوب غرب حوضه افزایش می‌یابد. شیب حوضه‌ی آبریز صفر تا ۴۸ درجه متغیر بوده و شیب مناطق شمالی کمتر از سایر مناطق است. بیش‌ترین فاصله از آبراه ۲۸۸۱ متر در شمال حوضه و کم‌ترین مقدار آن صفر است. تراکم زهکشی حوضه‌ی آبریز قوریچای از صفر تا ۲/۹ کیلومتر بر کیلومترمربع متغیر است که این نشان‌دهنده‌ی تراکم زیاد زهکشی در این حوضه است که نشان‌دهنده‌ی کوهستانی بودن منطقه است. دامنه‌ی تغییرات لایه‌ی فاصله از گسل صفر تا ۱۷۷۹۳ متر است. منطقه‌ی مورد مطالعه دارای دوازده واحد زمین‌شناسی است. همچنین این منطقه دارای هشت واحد مختلف از کاربری اراضی است (شکل ۳).







شکل (۳): نقشه‌های شاخص‌های به کاررفته در توان منابع آب زیرزمینی در آبریز قوریچای
Figure (3): Maps of indicators used in groundwater resources in Ghorichai catchment

در این مطالعه از بسته مدل‌سازی توزیع گونه R (نعیمی و آراجو^۱، ۲۰۱۶: ۳۷۰) برای پیش‌بینی فضایی پتانسیل توان آب زیرزمینی استفاده شد. الگوریتم جنگل تصادفی از کتابخانه‌ی جنگل تصادفی^۲ برای تهیه‌ی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفته شد. جنگل تصادفی یک روش پیش‌بینی است که از داده‌های تاریخی برای پیش‌بینی مقادیر با استفاده از متغیرهای مستقل و وابسته استفاده می‌کند. الگوریتم جنگل تصادفی می‌تواند بر اساس اطلاعات موجود در مورد مجموعه داده ساخته شود (سینگ و همکاران^۳، ۲۰۱۴: ۳۴۲۰، فکیولا و همکاران^۴، ۲۰۱۰: ۱۲). از طرف دیگر جنگل تصادفی مقدار یک متغیر وابسته را بر

1-Naimi and Araújo et al.
 2-Random Forest

3-Singh et al.
 4- Fakiola et al.

اساس چندین متغیر مستقل پیش‌بینی می‌کند. تجزیه و تحلیل منحنی مشخصه عملیاتی نسبی (ROC^۱) که معمولاً برای دقت یک آزمون تشخیصی استفاده می‌شود، در این مطالعه استفاده شد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲: ۹۷۰؛ چوبین و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۹۰). سطح زیر منحنی‌های ROC (AUC^۲) برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی محاسبه شد. شاخص AUC یک شاخص واجد شرایط برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی است که به طور گسترده توسط چندین مطالعه‌ی اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (فلاح^۳، ۲۰۱۷: ۱۰۷۲). مقدار AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است و AUC نزدیک به ۱ نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر پیش‌بینی است. در مطالعه‌ی حاضر، یک آنالیز حساسیت برای ارائه یک برآورد قوی از عدم قطعیت‌های مرتبط با لایه‌های ورودی مدل و همچنین بررسی اثرات حذف هر یک از عوامل شرطی‌سازی بر روی نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شد (داوودی مقدم و همکاران^۴، ۲۰۱۵: ۹۲۴؛ رحمتی، ۲۰۱۵: ۱۴۷). جدول ۳ میزان تأثیر هر یک از شاخص‌ها را در توان آب زیرزمینی حوضه‌ی آبریز قوریچای نشان می‌دهد که این مقادیر با استفاده از اجرای مدل جنگل تصادفی با استفاده از شاخص‌های تأثیرگذار به دست آمده است (جدول ۳).

جدول (۳): میزان تأثیر هر یک از شاخص‌ها در توان آب زیرزمینی حوضه‌ی آبریز قوریچای

Table (3): The effect of each of the indicators on the groundwater capacity of Qorichay catchment

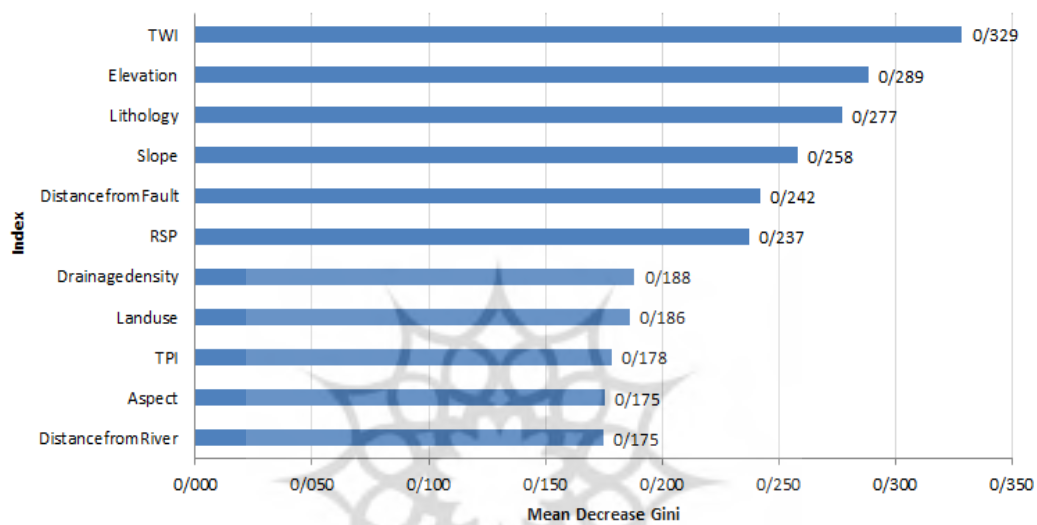
شاخص‌ها	میزان تأثیر
DistancefromRiver	۰/۱۷۵
Aspect	۰/۱۷۵
TPI	۰/۱۷۸
Landuse	۰/۱۸۶
Drainagedensity	۰/۱۸۸
RSP	۰/۲۳۷
DistancefromFault	۰/۲۴۲
Slope	۰/۲۵۸
Lithology	۰/۲۷۷
Elevation	۰/۲۸۹
TWI	۰/۳۲۹

شکل ۴ مربوط به نمودار نمودار آنالیز حساسیت است که میزان تأثیر هر یک از شاخص‌ها در توان آب زیرزمینی حوضه‌ی آبریز قوریچای نشان می‌دهد (شکل ۴).

1-Receiver operating characteristic
2-Area Under the Curve

3-Falah
4-Davoodi Moghaddam et al.

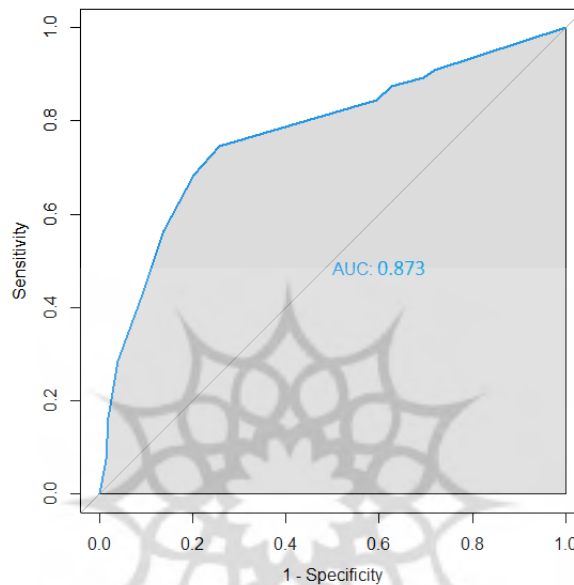
Sensitivity_Analysis



شکل (۴): نمودار آنالیز حساسیت برای تعیین میزان تأثیر هر یک از شاخص‌ها در توان آب زیرزمینی حوضه قوریچای

Figure (4): Sensitivity analysis chart to determine the impact of each of the indicators on the groundwater capacity of the Ghorichay basin

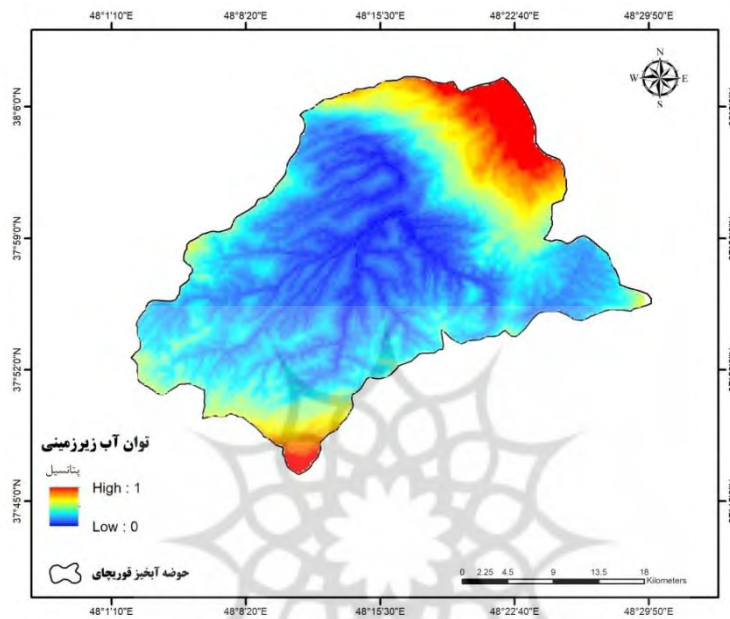
مطابق جدول ۳ و شکل ۴، میزان تأثیر هر یک از شاخص‌ها بر روی توان آب زیرزمینی حوضه آبریز قوریچای به صورت زیر است: بیشترین تأثیر مربوط به شاخص TWI با میزان ۰/۳۲۹ است. کمترین میزان تأثیر هم مربوط به شاخص فاصله از رودخانه و شاخص جهت شیب با مقدار ۰/۱۷۵ است. شاخص‌های ارتفاع با میزان ۰/۲۸۹، سنگ‌شناسی با میزان ۰/۲۷۷، شاخص شیب با میزان ۰/۲۵۸، فاصله از گسل با میزان ۰/۲۴۲، شاخص RSP با میزان ۰/۲۳۷، شاخص تراکم زهکشی با میزان ۰/۱۸۸، شاخص کاربری اراضی با میزان ۰/۱۸۶ و شاخص TPI با میزان ۰/۱۷۸ به ترتیب مقادیر تأثیرگذار بر توان آب زیرزمینی حوضه آبریز قوریچای هستند. شکل ۵، نتیجه ارزیابی و عملکرد مدل بر اساس AUC به دست آمده از نمودار ROC می‌باشد که با دقت ۰/۸۷۳ دقت تقریباً مناسبی در اجرای مدل و پیش‌بینی مقادیر داشته است.



شکل (۵): منحنی ROC و مقدار AUC محاسبه شده برای ارزیابی عملکرد مدل

Figure (5): ROC curve and AUC value calculated to evaluate model performance

شکل ۶ نقشه‌ی نهایی توان آب زیرزمینی را در حوضه‌ی آبریز قوریچای نشان می‌دهد. عدد صفر در این نقشه نشان‌دهنده‌ی میزان توان کمتر و عدد یک به معنای توان بالای آب زیرزمینی در این حوضه‌ی آبریز است. حدود هشت درصد حوضه توان آب زیرزمینی بسیار بالایی جهت ذخیره دارد (شکل ۶). با توجه به این که اکتشاف آب‌های زیرزمینی با روش‌های سنتی همیشه هزینه‌بر و زمان‌بر بوده است و دقت بسیار پایین نیز داشته است، تهیه کردن نقشه‌ی توان آب زیرزمینی با روش‌های نوین مانند الگوریتم جنگل تصادفی و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی ضروری است. در این تحقیق نقشه‌ی توان آب زیرزمینی حوضه‌ی آبریز قوریچای واقع در شهرستان اردبیل با در نظر گرفتن متغیرهای محیطی موثر و با استفاده از روش الگوریتم جنگل تصادفی و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و زبان برنامه‌نویسی R تهیه گردید.



شکل (۶): نقشه‌ی توان آب زیرزمینی در آبریز قوریچای
Figure (6): Groundwater power map in Ghorichay catchment

نتایج به دست آمده از این تحقیق و همچنین پژوهش‌های پیشین نشان داد که شاخص TWI یا همان رطوبت پستی و بلندی با میزان تأثیر $0/329$ بیشترین تأثیر را در توان آب زیرزمینی این حوضه‌ی آبریز دارد (گلکاریان و رحمتی^۱، ۲۰۱۸: ۱۷). همچنین شاخص ارتفاع با میزان $0/289$ پس از TWI تأثیر به سزایی دارد (رضوی و همکاران، ۱۳۹۶: ۷۳۳؛ لی و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۳۷۰). در مورد تأثیر شاخص شیب، منطقه خروجی حوضه‌ی آبریز با توجه به داشتن شیب پایین‌تر، بیش‌ترین توان آب زیرزمینی را به خود اختصاص داده است. در بخش سنگ‌شناسی، مناطق دارای نهشته‌های با اندازه پایین ($Qt2$) به علت خاصیت ذخیره‌ی آب در خود، در منطقه دارای توان بالا واقع شده‌اند. در بحث کاربری اراضی، مناطق دارای کشاورزی آبی و دیم و باغات (مختلط) دارای توان آب زیرزمینی بالایی هستند که این مورد با یافته‌ی ال‌عابدی و همکاران (۲۰۱۶: ۲۸۰) نیز مطابقت دارد. تراکم چاه‌های نیمه‌عمیق در حوضه‌ی آبریز قوریچای با میزان توان آب زیرزمینی این حوضه ارتباط مستقیم دارد به صورتی که بیشترین تراکم چاه‌ها درست در منطقه تمرکز توان بالای آب زیرزمینی واقع شده است. همچنین این بحث با بررسی شاخص ارتفاعی به وضوح خود را بهتر نشان می‌دهد به صورتی که با افزایش ارتفاع به دلیل کاهش ضخامت آبخوان، توان آب زیرزمینی و همچنین تراکم چاه‌ها نیز کم می‌شود و این یافته با

یافته‌های ال عابدی و همکاران (۲۰۱۶: ۲۸۱) و رزندی و همکاران (۱۳۹۶: ۱۱۹) مطابقت دارد. در این حوضه‌ی آبریز با کاهش شیب توان آب زیرزمینی افزایش نشان داده است که این عامل می‌تواند به علت کاهش روان‌آب و افزایش نفوذپذیری در این مناطق باشد که پتانسیل آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. در بررسی عامل تراکم آبراهه، تراکم بالای آبراهه در حوضه‌ی آبریز با منطقه با توان بالای آب زیرزمینی رابطه معکوس دارد و تراکم آبراهه نشان‌دهنده‌ی نفوذ پایین آب سطحی در حوضه‌ی آبریز است. بین فاصله از آب راه و توان آب زیرزمینی هم رابطه‌ی معکوس دیده شد به طوری که با افزایش یافتن فاصله از آبراه توان کم‌تر شد. این یافته ارتباط بین آب زیرزمینی و آب سطحی، و تأثیرگذاری آب سطحی بر آب زیرزمینی را با کاهش نفوذپذیری نشان می‌دهد. عرب عامری و همکاران (۱۳۹۷: ۴۳) و ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴: ۲۲۸) نیز ارتباط بین آب زیرزمینی و آب سطحی را تایید کردند. با بررسی عامل فاصله از گسل مشخص شد که با افزایش فاصله از گسل، توان آب زیرزمینی افزایش یافته است که به نظر می‌رسد رابطه‌ی منطقی نباشد و این شاید به دلیل ساختار سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی حوضه آبریز بوده باشد. منحنی ROC نشان داد که دقت مدل در برآورد کردن میزان پتانسیل آب زیرزمینی در مرحله‌ی آموزش خیلی خوب عمل کرده است و به دقت نسبتاً بالایی (۰/۸۷) دست یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی توان آب زیرزمینی در سطح حوضه‌ی آبریز قوریچای واقع در استان اردبیل پرداخته شد. حوضه‌ی آبریز قوریچای حوضه‌ای تقریباً طویل و کشیده با روند عمومی جنوبی-شمالی به شمار می‌آید که مساحتی در حدود ۸۰۰۰۰ هکتار دارد. در این پژوهش ۱۱ شاخص تأثیرگذار بر توان آب زیرزمینی شامل شیب، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از آبراه، تراکم زه‌کشی، فاصله از گسل، شاخص رطوبت پستی و بلندی، موقعیت پستی و بلندی، سنگ‌شناسی، کاربری زمین و موقعیت شیب نسبی به کار برده شد. به روش تصادفی ۳۰ درصد از مجموع ۵۸ چشمه در گروه داده‌های اعتبارسنجی و ۷۰ درصد آن در گروه داده‌های آموزش گذاشته شد. برای اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر و پهنه‌بندی توان آب زیرزمینی در آبریز قوریچای، روش جنگل تصادفی ارتقاء یافته با بیشینه آنتروپی با بهره‌گیری از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی به کار برده شد و برای ارزیابی مدل منحنی تشخیص عمل کرد نسبی (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) به کار برده شد. نتیجه نشان داد که توان آب زیرزمینی در حدود هشت درصد حوضه‌ی آبریز، بیش‌تر در خروجی حوضه است. بر اساس نمودار VIP لایه TWI با مقدار ۰/۳۲۹ و لایه فاصله از رودخانه با مقدار ۰/۱۷۵ به ترتیب بیش‌ترین و کمترین عامل‌های تأثیرگذار بر توان آب زیرزمینی با مقادیر بود. سطح زیر منحنی AUC نشان‌دهنده‌ی دقت ۸۷ درصدی در مرحله‌ی آموزش برای شناخت منطقه‌های دارای توان آب زیرزمینی بود. نتایج به دست آمده از منحنی ROC نشان داد که تلفیق الگوریتم جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی دقت نسبتاً خوبی در پیش‌بینی تأثیرات عوامل و

شاخص‌های مختلف در برآورد توان آب زیرزمینی دارد که می‌تواند برای تحقیقات آتی و مشابه به این الگوریتم استناد کرد. تحقیق اخیر می‌تواند راهگشای برنامه‌ریزی‌های آتی مدیران سازمان‌های مختلف در مدیریت منابع آبی حوضه‌ی آبریز مورد مطالعه باشد و به دلیل برداشت بیش از اندازه از چشمه‌ها و چاه‌های نیمه‌عمیق و احتمالاً در آینده چاه‌های عمیق، برای نیل به هدف‌های مختلف کشاورزی، صنعتی و خانگی، به کاربردن نتیجه‌ی این تحقیق در مدیریت منابع آب زیرزمینی آبریز قوریچای می‌تواند برنامه‌ریزی را برای مدیران آسان‌تر و دقیق‌تر می‌کند.



۵-منابع

- Al-Abadi A, Al-Temmeme A, Al-Ghanimy A. (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, Sustain. *Water Resources Management*. 2(3): 265–283.
- Alizadeh, A., (2010). Principles of Applied Hydrology. *Imam Reza University Press*, 28th edition.
- Arab Ameri, A., Rezaei, Kh., Yamani, M., Shirani, K., (2018). Modeling and preparation of groundwater potential map using a data-driven combined method of definitive evidence function - entropy index (Case study: Basin Najafabad.) *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 25 (2), 25-48. doi:10.22069 / jwsc.2018.14021.2879
- 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, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>.
- Biabani, Leila, Malekian, Arash, Akbarpour Bonab, Behrooz. (2020). Evaluation of Groundwater Resources Potential of Sufi Chay Watershed Using Frequency Ratio Models and GIS. *Hydrogeomorphology*, 7 (22), 43-65. doi:0.22034 / hyd.2020.14189
- Choubin, B., Rahmati, O., Soleimani, F., Alilou, H., Moradi, E., & Alamdari, N. (2019). Regional groundwater potential analysis using classification and regression trees. In *Spatial modeling in GIS and R for earth and environmental sciences* (pp. 485-498). *Elsevier*.
- Chowdhury, A., Jha, M.K., & Chowdary, V.M. (2010). Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences*, 59(6), 1209.
- Davoodi Moghaddam, D., Rezaei, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S., & Pradhan, B. (2015). Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(2), 913_929.
- Deng, F., Deng, Z., Lv, D., Wang, D., Duan, H., Xing, Z. (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.
- Fakiola, M., Mishra, A., Rai, M., Singh, S.P., O’Leary, R.A., Ball, S., Sundar, S. (2010). Classification and regression tree and spatial analyses reveal geographic heterogeneity in genome wide linkage study of Indian visceral leishmaniasis. *PLoS One*, 5(12), e15807.
- Falah, F., Ghorbani, S., Rahmati Nejad, O., Daneshfar, M., Zeinivand, H. (2017). Applicability of generalized additive model in groundwater potential modelling and comparison its performance by bivariate statistical methods, *Geocarto International*, 32:10, 1069-1089, DOI: 10.1080/10106049.2016.1188166.
- Gleeson, T., Van der Steen, J., Sophocleous, M.A., Taniguchi, M., Alley, W.M., Allen, D.M., & Zhou, Y. (2010). Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience*, 3, 378_379.

- Golkarian, A., Rahmati, O. (2018). Use of a maximum entropy model to identify the key factor that influence groundwater availability on the Gonabad Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 77: 369.
- Guo-Liang, D., Yong-Shuang, Z., Javed, I., Xin, Y. (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.
- Jothibas, A., Anbazhagan, S. (2016). Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River basin of South India using the analytic hierarchy process, Model. *Earth Systems and Environment*. 2: 109.
- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., Shiklomanov, I. (2008). *The implications of projected climate change for freshwater resources and their management*.
- Lee S, Hong SM, Jung HS. (2018). GIS-based groundwater potential mapping using artificial neural network and support vector machine models: The case of Boryeong city in Korea. *Geocarto International*. 33: 847–861.
- Lee S, Hyun Y, Lee M. (2019). Groundwater Potential Mapping Using Data Mining Models of Big Data Analysis in Goyang-si, South Korea. *Sustainability*. 11: 1678.
- Madadi, A., Asghari, P., Badamki, M., Qala, A. (2020). Flood risk zoning in the Koray Chay teapot catchment in Ardabil province. *Quantitative geomorphological research*. 9 (297-81, 2 (9). Doi:10.22034 / gmpj.2020.118226.
- Masoudian, A., Kaviani, M.R., (2007). Iranian Climatology, University of Isfahan Press.
- Mousavi SM, Golkarian A, Naghibi SA, Kalantar B, Pradhan B. (2017). GIS-based groundwater spring potential mapping using data mining boosted regression tree and probabilistic frequency ratio models in Iran, *Geoscience*. 3(1): 91.
- Mukherjee, P., Singh, C.K., & Mukherjee, S. (2012). Delineation of groundwater potential zones in arid region of India—A remote sensing and GIS approach, *Water Resources Management*, 26(9), 2643_2672.
- Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., & Abbaspour, K. (2018). A comparison between ten advanced and soft computing models for groundwater qanat potential assessment in Iran using R and GIS. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3-4), 967-984.
<https://doi.org/10.1007/s00704-016-2022-4>.
- Naimi, B., & Araújo, M. B. (2016). SDM: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, 39(4), 368_375.
- Oh, H.J., Kim, Y.S., Choi, J.K., Park, E., & Lee, S. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399(3-4), 158_172.

- Park, I., Kim, Y., & Lee, S. (2014). Groundwater productivity potential mapping using evidential belief function. *Groundwater*, 52(S1), 201_207.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecological Modelling*. 190: 231–259.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural Hazards*, 63(2), 965–996.
- Pourtaghi, Z.S., & Pourghasemi, H.R. (2014). GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, *Iran. Hydrogeology Journal*, 22, 643-662.
- Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahmoodi, N., Mahdavi, M., (2015). Assessment of the contribution of N fertilizers to nitrate pollution of groundwater in western Iran (Case study: Ghorveh–Dehgelan Aquifer), *Water Qual. Expo.Health*. 7 (13), 143–151.
- Razandi, Y, Farrokhzadeh, B, Yousefzadeh Chubak, M, Teymourian, T. (2017). Potential of groundwater resources using maximum entropy algorithm and GIS (Case study: Hamadan-Bahar plain). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 8 (1), 111-124.
- Razavi Termeh, S., and Saadi Mesgari, M., and Kazemi, K. (2017). Evaluation and comparison of frequency ratio, statistical index and entropy methods for preparing groundwater potential map using GIS (Case study: Jahrom city). *Echo Hydrology*, 4 (3), 725-736. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=464243>
- Rostamzadeh, H, Nikjoo, M R, Asadi, I, Jafarzadeh, J. (2015). Potential assessment of changes in drinking water quality in demographic areas of Ardabil plain using a combination of geostatistical models and multi-criteria decision making in GIS environment, *Hydrogeomorphology*, 2(3), 43-60.
- Russo, T.A., Fisher, A.T., & Lockwood, B.S. (2014). Assessment of Managed Aquifer Recharge Site Suitability Using a GIS and Modeling. *Groundwater*, 53(3), 389–400. doi:10.1111/gwat.12213
- Saeedi, M., Kamasi, M., Hassanpour, Sh. (2021). Potential of groundwater resources using the combined approach of AHP and Fuzzy Topsis (Case study: Silakhor plain). *Hydrogeomorphology*, 8 (26), 59-41. doi:10.22034 / hyd.2021.37835.1548.
- Sahoo, S., Munusamy, S.B., Dhar, A., Kar, A., Ram, P. (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.
- Singh, R., Wagener, T., Crane, R., Mann, M.E., & Ning, L. (2014). A vulnerability driven approach to identify adverse climate and land use change combinations for critical hydrologic indicator thresholds: Application to a watershed in Pennsylvania, USA. *Water Resources Research*, 50(4), 3409_3427.

- Teymouri, M., and Asadi Nilivan, A. (2020). The most important factors affecting groundwater capacity in Piranshahr watershed (West Azerbaijan) with MaxEnt model and GIS. *Watershed Management Research (Research and Construction)*, 33 (1 (126 consecutive)), 56-71. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=526501>.
- Wada, Y., van Beek, L.P., van Kempen, C.M., Reckman, J.W., Vasak, S., & Bierkens, M.F. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20)115.
- Zabihi, M., and Pourghasemi, H., and Behzadfar, M. (2015). Preparation of groundwater potential map using Shannon entropy models and random forest in Bojnourd plain. *Echo Hydrology*, 2 (2), 221-232. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=273853>.

