



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره دوم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14021.2879

شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی حوضه نجف‌آباد با روش ترکیبی داده‌محور تابع شواهد قطعی - شاخص آنتروپی

*علیرضا عرب‌عامری^۱، مسعود سهرابی^۲، خلیل رضایی^۳، مجتبی یمانی^۴ و کورش شیرانی^۵

^۱دانشجوی دکتری دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس و مدرس دانشکده علوم زمین دانشگاه دامغان،

^۲کارشناس ارشد عمران دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد ارومیه، ^۳استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی،

^۴استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ^۵استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش

کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱۵

چکیده

سابقه و هدف: به علت تغییرات جهانی آب و هوایی، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی آب جهت شرب، کشاورزی و تولید غذا در آینده می‌باشند. در حال حاضر، حوضه‌های آبگیر در سراسر جهان جهت تامین تقاضاهای رو به رشد آب به‌علت رشد جمعیت زیر فشار می‌باشند. مدیریت ذخایر آب زیرزمینی به‌صورت پایدار یک چالش اصلی می‌باشد. هدف از ارزیابی ذخایر آب زیرزمینی فراهم کردن اطلاعات در رابطه با وضعیت حال حاضر ذخایر آب و فراهم کردن درکی از وضعیت آب‌های زیرزمینی در آینده می‌باشد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران مختلفی تلاش کرده‌اند تا پتانسیل منابع آب زیرزمینی را با استفاده از روش‌های مختلف داده‌محور و دانش‌محور به همراه تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی ارزیابی کنند. هدف اصلی از این پژوهش شناسایی پارامترهای مؤثر در ذخیره آب‌های زیرزمینی و ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی با استفاده از رویکرد ترکیبی داده‌محور در حوضه آبخیز نجف‌آباد می‌باشد.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه بین مختصات جغرافیایی $32^{\circ}52'46''$ تا $51^{\circ}41'48''$ طول شرقی و $32^{\circ}18'06''$ تا $32^{\circ}50'12''$ عرض شمالی واقع شده است. در این پژوهش برای تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی با رویکرد ترکیبی ۶ مرحله اجرا گردید که شامل ۱- تهیه نقشه پراکندگی چاه‌های آب زیرزمینی و تقسیم آن به دو گروه آموزشی و اعتبارسنجی. ۲- ایجاد پایگاه داده. در این مرحله، لایه‌های پارامترهای مؤثر در ایجاد آب‌های زیرزمینی با استفاده از منابع مختلف مانند پیمایش‌های میدانی و سنجش از دور تهیه گردید. تمامی لایه‌ها جهت استفاده در آنالیزهای بعد تبدیل به فرمت رستر گردید. ۳- انجام تست هم‌خطی بین پارامترها و انتخاب پارامترهای مؤثر با استفاده از شاخص‌های ضریب تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF). ۴- محاسبه ارتباط بین موقعیت چاه‌های آموزشی و فاکتورهای مؤثر در ایجاد آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل شاخص آنتروپی و کلاس‌های آن‌ها با استفاده

* مسئول مکاتبه: alireza.ameri91@yahoo.com

از تابع شواهد قطعی. ۵- تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی با رویکرد ترکیبی و طبقه‌بندی آن به ۴ کلاس با روش شکست‌های طبیعی. ۶- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از مساحت زیر منحنی (AUC) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI).

نتایج: نتایج آنالیز تست هم‌خطی بین ۲۱ پارامتر زمین‌محیطی مؤثر در ایجاد آب‌های زیرزمینی در منطقه مطالعاتی نشان داد که مقادیر ضریب تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF) ۱۵ متغیر بزرگ‌تر از ۱/۱ و کوچک‌تر از ۱۰ بوده است. در نتیجه این پارامترها برای شبیه‌سازی انتخاب گردیدند. وزن‌های محاسبه شده برای هر یک از پارامترها با استفاده از مدل شاخص آنتروپی نشان داد که مؤثرترین فاکتورها در ایجاد آب‌های زیرزمینی در منطقه مطالعاتی فاصله از گسل، کاربری اراضی/ پوشش سطحی و زمین‌شناسی می‌باشد. طبق نتایج مدل ترکیبی، ۴۵/۲۶ درصد از حوضه در کلاس پتانسیل خیلی زیاد قرار گرفته است. نتایج صحت‌سنجی مدل‌ها نشان داد که مقدار مساحت زیرمنحنی برای مدل‌های شواهد قطعی، شاخص آنتروپی و مدل ترکیبی شواهد قطعی - شاخص آنتروپی به ترتیب ۰/۶۶۰، ۰/۴۳۱ و ۰/۸۹۹ می‌باشد که بیانگر دقت پیش‌بینی بهتر مدل ترکیبی می‌باشد. طبق نتایج شاخص SCAI، مقادیر این شاخص در هر سه مدل مناسب بوده است.

نتیجه‌گیری: مهم‌ترین نتیجه‌گیری پژوهش حاضر این است که رویکرد ترکیبی تابع شواهد قطعی - شاخص آنتروپی در ترکیب با تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی ابزار قدرتمندی را برای تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی در منطقه مطالعاتی فراهم کرده است. بر اساس نتایج رویکرد ترکیبی، مناطقی که به‌وسیله پتانسیل آب زیرزمینی خیلی زیاد پوشیده شده است، ۴۵/۲۶ درصد از کل منطقه می‌باشد که بیانگر این است که منطقه مطالعاتی دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالایی می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند جهت مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی، پارامترهای زمین‌محیطی، رویکرد ترکیبی، نجف‌آباد

مقدمه

برداشت در تمامی فصول و تحت تأثیر حوادث ناگهانی مانند خشکسالی قرار نگرفتن اشاره نمود (۱۹). از این نظر ارائه روش‌هایی به‌منظور مدیریت آب‌های زیرزمینی و شناسایی پتانسیل آب‌های زیرزمینی در مقیاس‌های ملی، منطقه‌ای و محلی ضروری می‌باشد (۲۹). تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی ضروری می‌باشد و می‌تواند به‌عنوان اقدامات اولیه در زمینه مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته شود. سنجش از دور و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی، در مقایسه با روش‌های سنتی در زمینه ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی که بسیار وقت‌گیر، کم‌دقت و پرهزینه هستند، دارای

در دهه‌های اخیر در بسیاری از کشورها از جمله ایران به‌دلیل گسترش جمعیت و صنعتی‌شدن، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی شناخته شده‌اند (۱۳) و تقریباً ۵۰ درصد از آب مورد استفاده برای شرب، ۴۰ درصد از آب مورد نیاز برای صنعت و ۲۰ درصد از آب کشاورزی را فراهم می‌کنند (۱۷). از جمله مزیت‌های آب‌های زیرزمینی نسبت به آب‌های سطحی می‌توان به ذخیره آب‌های زیرزمینی به‌طور طبیعی در مواقع عدم برداشت، عدم اشغال زمین‌های وسیع در هنگام ذخیره، در امان بودن از تأثیر جریان‌های تبخیر و تعرق و آلودگی، قابلیت

پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که مدل آنتروپی شانون با مقادیر سطح زیرمنحنی ۸۵/۵۵ درصد دارای کارایی بالاتری نسبت به مدل جنگل تصادفی در شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشد (۴۵). نمپاک و همکاران (۲۰۱۴) از روش داده‌محور شواهد وزن قطعی به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه لانگات در مالزی استفاده کردند و بدین‌منظور از ۱۲ پارامتر ارتفاع، شیب، انحنای سطح، شاخص قدرت جریان، شاخص خیزی توپوگرافی، تراکم آب‌راه، لیتولوژی، تراکم گسل، کاربری اراضی، خاک، بارندگی و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل شواهد وزن قطعی دارای کارایی بالایی در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشد (۲۵). پورقاسمی و بهشتی‌راد (۲۰۱۴) به ارزیابی روش داده‌محور شواهد وزن قطعی به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه کوه‌رنگ با استفاده از پارامترهای ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، طول‌شیب، شاخص خیزی توپوگرافی، انحنای سطح، کاربری اراضی، فاصله از آب‌راه، تراکم آب‌راه، فاصله از گسل و تراکم آب‌راه پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که این روش شواهد وزن قطعی با مساحت زیرمنحنی ۸۱/۷۲ درصد دارای کارایی مناسب در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشد (۲۷). هدف اصلی در این پژوهش ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز نجف‌آباد با استفاده از رویکرد ترکیبی شاخص آنتروپی - تابع شواهد قطعی می‌باشد. نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه استفاده از ترکیب دو روش کارآمد در زمینه ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی و همچنین ارزیابی و اولویت‌بندی پارامترهای زمین‌محیطی با استفاده از شاخص‌های عامل تورم واریانس (VIF) و ضریب تحمل (Tolerance) می‌باشد.

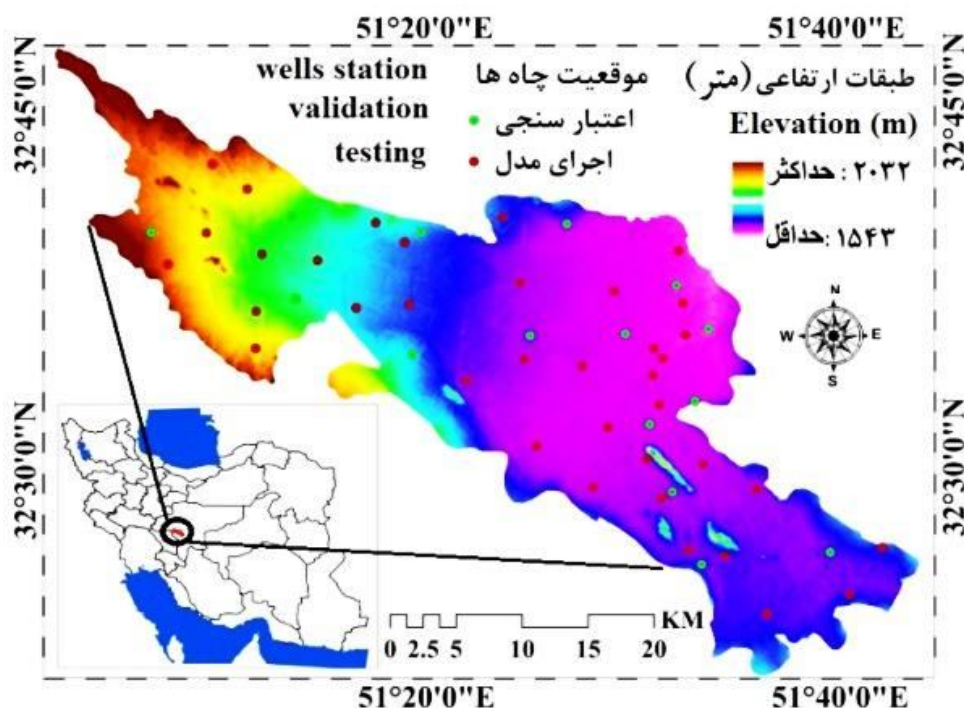
کارایی بالایی بوده و باعث افزایش دقت و سرعت پژوهش‌ها در زمینه ارزیابی آب‌های زیرزمینی شده‌اند (۸ و ۱۱). به‌منظور تعیین پتانسیل آب‌های زیرزمینی پارامترهای زمین‌محیطی متعددی نقش حیاتی بازی می‌کنند که شامل فاکتورهای اقلیمی (بارندگی)، فاکتورهای توپوگرافیک (ارتفاع، شیب، جهت شیب، شکل شیب و انحنای توپوگرافیک)، فاکتورهای هیدرولوژیک (شاخص خیزی توپوگرافی (TWI)، شاخص قدرت حمل رسوب (SPI)، فاصله از آب‌راه و تراکم آب‌راه)، فاکتورهای ژئولوژیک (لیتولوژی و فاصله از گسل) و فاکتورهای اکولوژیک (کاربری اراضی، شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی^۱، فاصله از جاده، عمق خاک، نفوذپذیری، بافت خاک و نوع خاک) می‌باشند (۳۴، ۳۷، ۳۹ و ۴۰). تاکنون روش‌های مختلفی در زمینه تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی توسط پژوهشگران مختلف استفاده شده است که می‌توان به روش‌های نسبت فراوانی (۳۱)، رگرسیون لجستیک (۲۶)، تصمیم‌گیری چندمعیاره (۱۳)، شبکه عصبی مصنوعی (۱۵)، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (۳۶)، وزن واقعه (۳۰)، جنگل تصادفی (۲۲ و ۴۲) تابع شواهد قطعی (۲۲، ۲۵ و ۲۸) درخت تصمیم (۴)، شاخص همپوشانی وزنی (۲۱) و شاخص آنتروپی (۷، ۱۲ و ۲۳) اشاره نمود. نقیعی و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی در حوضه آبخیز مغان در خراسان رضوی از مدل‌های نسبت فراوانی و شاخص آنتروپی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل آنتروپی شانون با سطح زیرمنحنی برابر با ۹۱/۲۱ درصد دارای توانایی بالایی در شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب‌های زیرزمینی می‌باشد (۲۳). ذبیحی و همکاران (۲۰۱۵) به تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در دشت بجنورد با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و جنگل تصادفی

1- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: حوضه نجف‌آباد بین طول جغرافیایی $51^{\circ}41'48''$ تا $50^{\circ}52'46''$ طول شرقی و $32^{\circ}18'06''$ تا $32^{\circ}50'12''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این دشت در سمت شمال غرب شهر اصفهان و به فاصله حدود ۳۰ تا ۹۰ کیلومتری این شهر در مسیر جاده اصلی اصفهان به خوزستان قرار گرفته است و با شهر داران ۳۵ کیلومتر فاصله دارد. عبور زاینده رود در بخش جنوب شرقی منطقه و تأثیر آن بر سفره آب‌های زیرزمینی باعث شده تا در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد بخش‌های با شرایط هیدروژئولوژی و هیدرولوژی بسیار متفاوتی به وجود آید. به طوری که بخشی از منطقه مورد مطالعه شامل

دره نجف‌آباد است که دارای منابع تغذیه آبی متفاوتی نسبت به سایر بخش‌های محدوده است و سفره فقیری را در بر دارد. مهم‌ترین مناطق مسکونی واقع در این محدوده شامل شهرهای فلاورجان، درچه، قهدریجان، کلیشاد، فولادشهر، پیربکران، باغ ابریشم، و آب‌نیل می‌باشد. گسل‌های متعددی در واحدهای سنگی منطقه به صورت مجموعه‌ای از گسل‌های اصلی و فرعی شکل گرفته است. مهم‌ترین این گسل‌ها، گسل‌های تراستی می‌باشند که در نواحی شمالی و خاوری حوضه دیده می‌شوند این گسل‌ها موجب راندگی واحدهای کرتاسه میانی شده‌اند. راستای این گسل‌ها شمال باختری جنوب خاوری بوده و شیب صفحه گسلی به سمت شمال خاوری می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی.

Figure 1. Geographical location of study area.

روش پژوهش: اطلاعات مربوط به چاه‌های آب زیرزمینی از اداره مدیریت منابع آب استان اصفهان و اداره کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان تهیه گردید. بر اساس پژوهش‌های پیشین و گزارش‌های اداره آب تنها داده‌های چاه‌های آب زیرزمینی با پتانسیل آبدهی بالا (بیش از ۱۱ مترمکعب در ساعت) مورد استفاده قرار گرفت (۲۵ و ۳۲). داده‌های چاه‌های آب زیرزمینی (۵۲ موقعیت چاه) به‌طور تصادفی به دو گروه شبیه‌سازی (۳۷ موقعیت چاه) و اعتبارسنجی (۱۵ موقعیت چاه) تقسیم‌بندی گردید. در شکل ۱ موقعیت چاه‌های شبیه‌سازی و اعتبارسنجی نشان داده شده است. به‌منظور تعیین پارامترهای زمین‌محیطی مؤثر در ایجاد آب‌های زیرزمینی در ابتدا با استفاده از ویژگی‌های منطقه مطالعاتی و مطالعه ادبیات پژوهش، در ابتدا ۲۱ پارامتر مؤثر شناسایی گردید و لایه‌های اطلاعاتی آنها تهیه گردید، در گام بعد تست هم خطی بین پارامترها انجام گردید و با استفاده از شاخص‌های ضریب تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF) از بین ۲۱ پارامتر، ۱۵ پارامتر شامل پارامترهای توپوگرافیک، اقلیمی، هیدرولوژیک، ژئولوژیک و اکولوژیک به‌منظور شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲، الف تا ی). پارامترهای توپوگرافیک: ارتفاع، زاویه شیب (درجه)، جهت شیب، انحنای توپوگرافیک و انحنای مقطع می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های سطح به‌منظور ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند (۱۳). داده‌های ماهواره‌ای SRTM با قدرت تفکیک ۳۰ متر به‌منظور تهیه مدل رقومی ارتفاعی در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. طبقات ارتفاعی مختلف باعث ایجاد شرایط اقلیمی متفاوت شده و در

نتیجه باعث ایجاد خاک و نوع پوشش گیاهی متفاوت می‌گردد (۱۳). طبقات ارتفاعی منطقه مطالعاتی به‌وسیله مدل رقومی ارتفاعی تهیه گردید و به ۶ کلاس تقسیم‌بندی گردید. ارتفاع منطقه مطالعاتی از ۱۵۴۳ تا ۲۰۳۲ متر متغیر می‌باشد. زاویه شیب عمدتاً فرآیند تغذیه آب‌های زیرزمینی، نفوذ و رواناب را کنترل می‌کند (۱۳)، بنابراین یک فاکتور مؤثر جهت پیش‌بینی فضایی پتانسیل آب‌های زیرزمینی می‌باشد. نقشه شیب بر اساس مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از ابزار Spatial Analysis در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه گردید و به ۶ کلاس $2 > 4-2, 8-4, 16-8$ و <math>28 < 16-28 </math> تقسیم‌بندی گردید. جهت شیب وابسته به جهت عمده بارش و روند فیزیوگرافیک می‌باشد و بر روی میزان دریافت بارش و نوع پوشش گیاهی تأثیرگذار می‌باشد (۹). نقشه جهت شیب از مدل رقومی ارتفاعی استخراج و به ۹ کلاس طبقه‌بندی گردید. ۳ نوع انحنای وجود دارد که شامل انحنای توپوگرافیک^۱ (شکل شیب)، انحنای مقطع^۲ و انحنای کلی^۳ می‌باشد. در این پژوهش از انحنای توپوگرافیک و انحنای مقطع به‌منظور تعیین پتانسیل آب‌های زیرزمینی استفاده شده است. انحنای سطح بر روی همگرایی و واگرایی جریان تأثیر می‌گذارد و انحنای مقطع مطابق با جهت حداکثر شیب می‌باشد و عمدتاً بر روی سرعت جریان در سطح تأثیرگذار است (۱). نقشه انحنای توپوگرافیک و انحنای مقطع با استفاده از مدل رقومی و در محیط نرم‌افزار SAGA-GIS تهیه گردید. انحنای توپوگرافیک به ۳ کلاس مقعر، هموار و محدب تقسیم‌بندی گردید. مقادیر منفی انحنای

1- Plan curvature
2- Profile curvature
3- Total curvature

پارامترهای هیدرولوژیک: پارامترهای هیدرولوژیک مانند شاخص خیسی توپوگرافی^۱ (TWI)، شاخص توان آبراهه^۲ (SPI)، تراکم آبراهه و فاصله از آبراهه نقش مهمی در سیستم‌های هیدرو-ژئولوژیک دارند. شاخص‌های خیسی توپوگرافی و توان آبراهه نقش مهمی در تنوع فضایی شرایط هیدرولوژیک مانند رطوبت خاک، جریان آب زیرزمینی و ثبات شیب دارند (۱۶). شاخص خیسی توپوگرافی توسط پژوهشگران زیادی تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (۸ و ۲۴) و به صورت زیر تعریف می‌گردد (۲۰).

$$TWI = IN \left(\frac{As}{\tan\beta} \right) \quad (1)$$

که در آن، As مساحت شیب‌های بالایی که به وسیله یک سلول زهکشی می‌گردد به کیلومتر مربع و β زاویه شیب به درجه می‌باشد. نقشه خیسی توپوگرافی بر اساس شکست‌های طبیعی به ۴ کلاس >۱۰،

$$SPI = B_s \times \tan\alpha \quad (2)$$

که در آن، B_s مساحت حوضه به مترمربع و $\tan\alpha$ شیب محلی به درجه می‌باشد. نقشه توان آبراهه پس از تهیه به ۶ کلاس >۲۰۰۰، ۱۰۰۰-۲۰۰۰، ۲۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰-۱۰۰ و <۲۰ تقسیم گردید. سیستم زهکشی یک منطقه به طبیعت و ساختار سازندهای زمین‌شناسی، ظرفیت جذب بارندگی به وسیله خاک، نرخ نفوذپذیری و زاویه شیب بستگی دارد (۱۹). تراکم آبراهه به عنوان نزدیکی فاصله

توپوگرافیک بیانگر تععر و مقادیر مثبت آن بیانگر تحذب سطح می‌باشد. مقادیر صفر نشان‌دهنده هموار بودن سطح می‌باشد (۲۳). انحنای مقطع نیز به ۳ کلاس تقسیم‌بندی گردید.

پارامترهای اقلیمی: بارندگی مهم‌ترین پارامتر اقلیمی مؤثر در تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌باشد (۳۶ و ۴۴). بارندگی به منظور ارزیابی ورود آب به حوضه آبخیز و درک شرایط تغذیه‌ای حوضه بسیار مهم می‌باشد (۱۳). به منظور تهیه نقشه بارندگی از آمار بارندگی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در یک دوره آماری ۳۰ ساله (از سال ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ هجری شمسی) استفاده گردید. نقشه تهیه شده به ۵ کلاس >۱۴۵، ۱۵۵-۱۴۵، ۱۶۵-۱۵۵، ۱۷۵-۱۶۵ و <۱۷۵ تقسیم‌بندی گردید.

که در آن، As مساحت شیب‌های بالایی که به وسیله یک سلول زهکشی می‌گردد به کیلومتر مربع و β زاویه شیب به درجه می‌باشد. نقشه خیسی توپوگرافی بر اساس شکست‌های طبیعی به ۴ کلاس >۱۰،

که در آن، B_s مساحت حوضه به مترمربع و $\tan\alpha$ شیب محلی به درجه می‌باشد. نقشه توان آبراهه پس از تهیه به ۶ کلاس >۲۰۰۰، ۱۰۰۰-۲۰۰۰، ۲۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰-۱۰۰ و <۲۰ تقسیم گردید. سیستم زهکشی یک منطقه به طبیعت و ساختار سازندهای زمین‌شناسی، ظرفیت جذب بارندگی به وسیله خاک، نرخ نفوذپذیری و زاویه شیب بستگی دارد (۱۹). تراکم آبراهه به عنوان نزدیکی فاصله

1- Topography wetness index

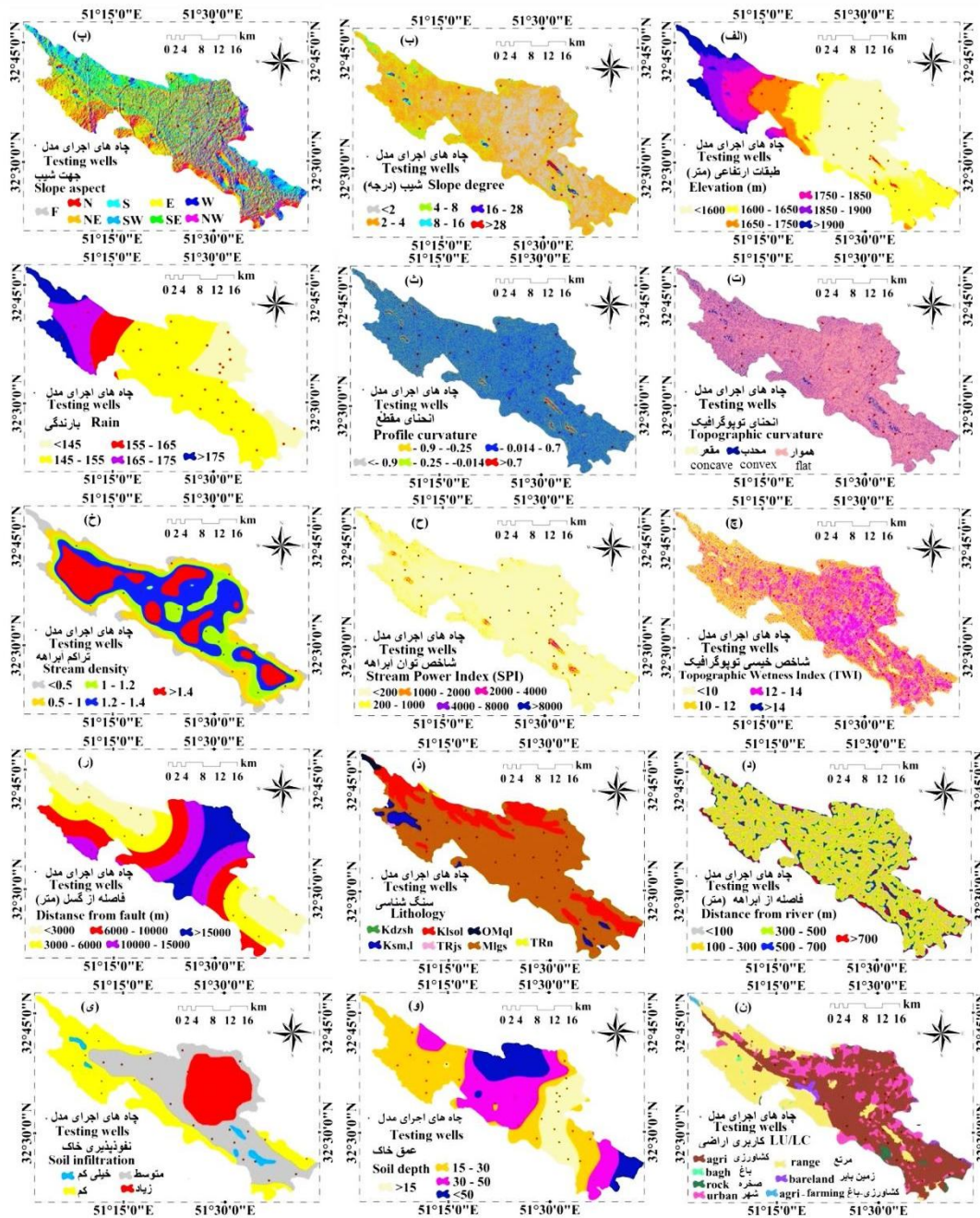
2- Stream power index

نظارت شده حداکثر شباهت در نرم‌افزار ENVI 4.3 استفاده گردید. کاربری‌ها و پوشش سطحی منطقه شامل کشاورزی، باغ، صخره، شهر، کشاورزی-باغ، مرتع و زمین بایر می‌باشد. سطوح غیرقابل نفوذ مانند شهر و صخره‌ها رواناب را افزایش داده و در مقابل زمین‌های کشاورزی به‌علت رابطه قوی تراکم پوشش گیاهی و ظرفیت نفوذ، از سیلاب جلوگیری می‌کنند (۳۸). عمق خاک یکی از مهم‌ترین عوامل در تولید رواناب سطحی و زیرسطحی و فرآیند نفوذ می‌باشد (۲۱). نقشه عمق خاک از سازمان آب منطقه‌ای استان اصفهان تهیه گردید و به ۴ کلاس طبقه‌بندی گردید. به‌منظور تهیه نقشه قابلیت نفوذ، در ابتدا ۷۰ نمونه خاک از عمق ۲۰ سانتی‌متری از زیر سطح آب زیرزمینی جمع‌آوری گردید و به‌منظور انجام آنالیزهای دانه‌بندی به آزمایشگاه خاک سازمان مرکز تحقیقات اصفهان انتقال یافت. موقعیت برداشت هر یک از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید. با استفاده از آنالیز نمونه‌ها نوع و بافت خاک مشخص گردید و با استفاده از آن‌ها مقادیر نفوذپذیری خاک نمونه‌های برداشتی محاسبه گردید. در مرحله بعد با استفاده از میان‌یابی به روش کریجینگ لایه رستری مقادیر نفوذپذیری برای کل منطقه محاسبه گردید و به ۴ کلاس خیلی کم، کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی گردید.

زهکشی به ۵ کلاس >0.5 ، $0.5-1$ ، $1-1/2$ ، $1/2-1/4$ و $<1/4$ کیلومتر در کیلومتر مربع تقسیم‌بندی گردید. فاصله از آبراهه نقش مهمی در پتانسیل آب‌های زیرزمینی دارد (۱۱). نقشه فاصله از آبراهه از طریق ابزار buffer در ArcGIS 10.3 محاسبه و به ۵ کلاس >1000 ، $300-1000$ ، $500-300$ ، $700-500$ و <700 تقسیم‌بندی گردید.

پارامترهای ژئولوژیک: لیتولوژی از طریق تأثیر بر روی نفوذپذیری و هدایت هیدرولیک بر روی پتانسیل آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار است (۲). نقشه لیتولوژی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ در ArcGIS 10.3 تهیه گردید. لیتولوژی منطقه مطالعاتی متنوع بوده و شامل ۷ نوع سنگ می‌باشد. گسل عمدتاً پستی و بلندی، توزیع فضایی شبکه آبراهه و تجمع آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر شیب را کنترل می‌کند (۳۳). نقشه فاصله از گسل در ArcGIS 10.3 و با ابزار buffer تهیه گردید.

پارامترهای اکولوژیک: کاربری اراضی و خاک از مهم‌ترین پارامترهای اکولوژیک می‌باشند. کاربری اراضی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر روی برخی از فرآیندهای هیدرولوژیک مانند نفوذپذیری، تبخیر و تعرق و تولید رواناب تأثیرگذار است. نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی از طریق تصویر Landsat 8 و بازبینی‌های میدانی گسترده تهیه گردید. به‌منظور طبقه‌بندی پوشش سطحی از الگوریتم طبقه‌بندی



شکل ۲- نقشه پارامترهای مؤثر در پتانسیل آب زیرزمینی.

Figure 2. Effective parameters map in groundwater potential.

در دامنه‌ای بین ۰ و ۱ است و مجموع مقادیر قطعیت، عدم قطعیت و عدم اطمینان ۱ است (۱۴). در آنالیز پتانسیل منابع آب زیرزمینی بر اساس مدل تابع شواهد قطعی، ساختار مدل می‌تواند به شکل رابطه زیر نشان داده شود.

مدل تابع شواهد قطعی: مدل تابع شواهد قطعی بر اساس تئوری دمپستر- شیفر می‌باشد که نوع ساده شده احتمالات بالا و پایین بیزین می‌باشد (۶ و ۳۵). این مدل شامل درجاتی از قطعیت (Bel)، عدم قطعیت (Dis)، عدم اطمینان (Unc) و احتمال (Pls)

$$m = 2^\theta = \{\emptyset, T_p, \overline{T_p}, \theta\} \quad \theta = \{T_p, \overline{T_p}\} \quad (3)$$

که در آن، T_p پیکسل‌هایی است که به‌وسیله تولید آب‌هایی زیرزمینی تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد، $\overline{T_p}$ پیکسل‌هایی است که به‌وسیله تولید آب‌های زیرزمینی تحت‌تأثیر قرار نمی‌گیرد و \emptyset مجموعه خالی است. بر اساس رابطه بالا، تابع قطعیت (Bel) می‌تواند به‌صورت رابطه‌های ۴ و ۵ بیان گردد:

$$[\lambda(T_p)_{A_{ij}}] = \left[\frac{N(F \cap A_{ij})}{N(F)} \right] / \left[(N(A_{ij}) - N(F \cap A_{ij})) / (N(P) - N(F)) \right] \quad (4)$$

$$(Bel) = \left[\frac{[\lambda(T_p)_{A_{ij}}]}{\sum [\lambda(T_p)_{A_{ij}}]} \right] \quad (5)$$

که در آن، $N(F \cap A_{ij})$ تراکم پیکسل‌های چاه‌هایی است که در A_{ij} رخ داده‌اند، $N(F)$ تراکم کلی تمامی چاه‌ها در منطقه مطالعاتی می‌باشد، $N(A_{ij})$ تراکم پیکسل‌ها در A_{ij} و $N(P)$ تراکم پیکسل‌ها در کل منطقه مطالعاتی می‌باشد. به‌عبارت دیگر تابع عدم قطعیت (Dis) می‌تواند بر اساس رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه گردد (۲۲).

$$[\lambda(\overline{T_p})_{A_{ij}}] = \left[\frac{N(F \cap A_{ij})}{N(F)} \right] / \left[(N(P) - N(F) - N(A_{ij}) + N(F \cap A_{ij})) / (N(P) - N(F)) \right] \quad (6)$$

$$(Dis) = \frac{[\lambda(\overline{T_p})_{A_{ij}}]}{\sum [\lambda(\overline{T_p})_{A_{ij}}]} \quad (7)$$

توابع عدم اطمینان (Unc) و احتمال (Pls) به‌صورت رابطه‌های ۸ و ۹ تعریف می‌گردد.

$$(Unc) = [1 - (Bel) - (Dis)] \quad (8)$$

$$(Pls) = [1 - (Dis)] \quad (9)$$

قطعیت است. مقدار آنتروپی یک سیستم با درجه بی‌نظمی آن سیستم در ارتباط است. تئوری مذکور اولین بار توسط استفان بولتزمن مطرح و نهایتاً توسط شانون به‌صورت کمی ارائه گردید (۳۴). نحوه محاسبه شاخص آنتروپی به‌ترتیب روابط زیر می‌باشد.

و در نهایت از مجموع وزن تابع قطعیت (Bel) هر یک از زیرکلاس‌های پارامترها، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی حاصل می‌گردد (۲۲).
مدل شاخص آنتروپی: آنتروپی روشی جهت اندازه‌گیری یک سیستم بی‌نظم، ناپایدار، نامتعادل و دارای عدم

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} P_{ij}} \quad (10)$$

$$H_j = - \sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), j = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$H_{j \max} = \log_2 S_j \quad S_j - \text{number of classes} \quad (12)$$

$$I_j = \frac{H_{j \max} - H_j}{H_{j \max}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad (14)$$

هر یک از زیرکلاس‌ها با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی و وزن عوامل به‌وسیله شاخص آنتروپی، به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی (GPM) از رابطه زیر استفاده گردید. فلوجارت پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

که در آن، تراکم چاه‌های آب زیرزمینی در هر طبقه، (P_{ij}) احتمال تراکم چاه آب زیرزمینی هر عامل و کلاس‌های مرتبط با آن، H_j و $H_{j \max}$ مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات و W_j وزن نهایی هر عامل می‌باشد. پس از تعیین وزن

$$GPM = \left[\left(\begin{matrix} \text{ارتفاع} \\ W_j \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{طبقات ارتفاع} \\ Bel \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} \text{شیب} \\ W_j \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{شیب طبقات} \\ Bel \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} \text{جهت شیب} \\ W_j \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{طبقات جهت شیب} \\ Bel \end{matrix} \right) + \dots + \left(\begin{matrix} \text{انحنای توپوگرافیک} \\ W_j \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{طبقات انحنای توپوگرافیک} \\ Bel \end{matrix} \right) + \dots + \left(\begin{matrix} \text{نفوذپذیری خاک} \\ W_j \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{طبقات نفوذپذیری خاک} \\ Bel \end{matrix} \right) \right] \quad (15)$$

نشده است ترسیم می‌گردد. رابطه کمی- کیفی بین AUC و دقت پیش‌بینی که دامنه بین ۰/۵ تا ۱ را شامل می‌شود به‌شرح ذیل می‌باشد: ۰/۹-۱ دقت عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵-۰/۶ دقت ضعیف (۴۳). با توجه به این‌که برای ارزیابی مدل نمی‌توان از موقعیت چاه‌های شبیه‌سازی استفاده نمود، از بین موقعیت چاه‌ها، ۷۰ درصد برای اجرای مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت (۳).

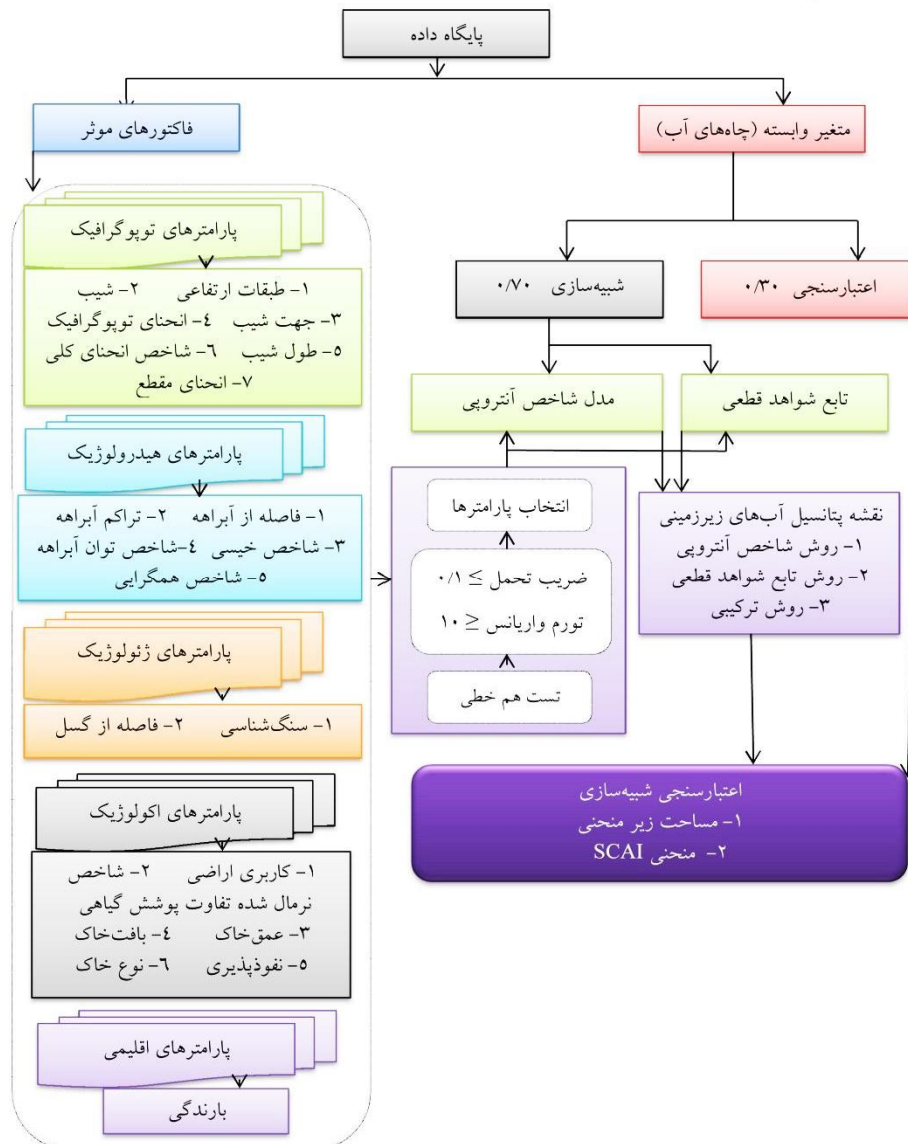
اعتبارسنجی شبیه‌سازی: به‌منظور ارزیابی مدل با استفاده از مساحت زیرمنحنی (AUC) در منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) قدرت پیش‌بینی مدل و با استفاده از شاخص سطح سلول هسته^۱ (SCAI) دقت تفکیک بین طبقات مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. در مساحت زیرمنحنی، درصد چاه‌های آب زیرزمینی که به درستی به‌وسیله مدل پیش‌بینی شده است در مقابل درصد چاه‌هایی که به درستی پیش‌بینی

1- Seed Cell Area Index

پارامترها در مناطق چاه‌های آب زیرزمینی و مناطق فاقد چاه استخراج گردید و در محیط SPSS تست هم‌خطی محاسبه گردید. نتایج حاصل از تست هم‌خطی بین ۲۱ پارامتر موثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آنالیز نشان داد که از بین ۲۱ پارامتر، پارامترهای بافت خاک، طول‌شیب، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، نوع خاک، شاخص همگرایی و انحنای کلی هم‌خطی داشته و در نتیجه از فرآیند شبیه‌سازی حذف گردیدند.

نتایج

در تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی، اگر در جریان شبیه‌سازی بین پارامترها هم‌خطی وجود داشته باشد، دقت پیش‌بینی مدل کاهش می‌یابد، در نتیجه بررسی تست هم‌خطی بین پارامترهای مؤثر ضروری می‌باشد. در این پژوهش برای تعیین هم‌خطی از پارامترهای Tolerance و VIF استفاده شده است. اگر مقادیر Tolerance و VIF به ترتیب ≤ 0.1 و ≥ 10 باشد، بین پارامترها هم‌خطی وجود دارد (۵). برای محاسبه تست هم‌خطی مقادیر عددی هر یک از



شکل ۳- فلوچارت تحقیق.

Figure 3. Flowchart of research.

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های Tolerance و VIF برای هر یک از پارامترها.

Table 1. VIF and Tolerance values for each of parameters.

پارامترها Parameters	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(Constant)	5.324	1.936	-	2.750	0.008	-	-
Soil depth عمق خاک	-0.022	0.054	-0.056	-0.404	0.688	0.545	1.835
Slope شیب	0.060	0.051	0.228	1.176	.245	0.278	3.599
Soil texture بافت خاک	0.043	0.021	1.089	2.029	0.047	0.036	27.549
Slope length طول شیب	1.613	3.006	0.311	0.537	0.594	0.031	32.234
Plan curvature انحنای توپوگرافیک	-1.112	3.002	-0.138	-0.371	0.712	0.75	5.295
Infiltration نفوذپذیری	0.119	0.063	0.230	1.903	0.062	0.716	1.397
Lithology سنگ شناسی	0.078	0.039	0.248	1.984	0.052	0.667	1.500
Dis-stream فاصله از آبراهه	0.125	0.186	0.081	0.670	0.506	0.723	1.383
Dense-stream تراکم آبراهه	0.000	0.000	-0.128	-1.002	0.321	0.643	1.556
Soil type نوع خاک	-0.007	0.003	-1.464	-2.486	0.016	0.030	33.188
Dis-fault فاصله از گسل	-2.74	0.000	-0.271	-1.732	0.089	0.427	2.343
Aspect جهت شیب	0.001	0.001	0.110	0.988	0.328	0.844	1.184
Total curvature انحنای کلی	-0.395	2.856	-0.104	-0.138	0.891	0.018	54.448
SPI شاخص خیزی توپوگرافی	-1.85	0.045	0.000	0.000	1.000	0.566	1.766
TWI شاخص توان آبراهه	0.000	0.000	0.068	0.280	0.781	0.177	5.647
LU/LC کاربری اراضی	-0.008	0.025	-0.101	-0.334	0.739	0.115	8.700
Rainfall بارندگی	0.000	1.432	0.54	0.000	0.532	0.145	3.654
Elevation ارتفاع	0.004	0.003	0.189	1.463	0.149	0.627	1.595
Profile curvature انحنای مقطع	0.009	0.001	0.234	2.324	0.123	0.109	2.890
Convergence index شاخص همگرایی	-0.03	5.98	-0.213	-0.127	0.098	0.076	26.6
شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی Normalized Difference Vegetation Index	-0.05	6.35	-0.175	-0.109	0.065	0.053	31.9

پارامتر انحنای مقطع، با کسب بیش‌ترین امتیاز ۰/۳۹ نسبت به بقیه کلاس‌ها، ارتباط بیش‌تری با ایجاد منابع آب زیرزمینی داشته است. بر اساس پارامتر بارندگی، کلاس کم‌تر از ۱۴۵ میلی‌متر در سال، با وجود این‌که دارای کم‌ترین مقدار بارندگی نسبت به بقیه کلاس‌ها می‌باشد، بیش‌ترین تأثیر را در وقوع سفره‌های آب زیرزمینی داشته است (۰/۳۰)، مهم‌ترین علت آن ارتباطی است که بین بارندگی و ارتفاع وجود دارد. در مناطق مرتفع با شیب بالا میزان بارندگی بیش‌تر است ولی به‌دلیل شیب بالا و شرایط زمین‌شناسی، بارندگی تبدیل به رواناب شده و نفوذ بسیار کم می‌باشد. در پارامتر شاخص خیسی، کلاس ۱۲-۱۰ و در پارامتر شاخص توان آبراهه کلاس ۴۰۰۰-۲۰۰۰ به‌ترتیب با امتیازات (۰/۳۴، ۰/۲۹) رابطه قوی با ایجاد آب‌های زیرزمینی داشته‌اند. بر اساس پارامتر تراکم آبراهه، کلاس‌های با تراکم آبراهه بالا و پایین رابطه‌ای با ایجاد سفره‌های آب زیرزمینی ندارند، تراکم آبراهه بالا رواناب را افزایش داده و باعث کاهش نفوذ می‌گردد. بر اساس پارامتر فاصله از آبراهه، با افزایش فاصله از آبراهه تعداد چاه‌های آب زیرزمینی کاهش پیدا می‌کند که این موضوع بیانگر رابطه قوی شبکه آبراهه با منابع آب زیرزمینی است. کلاس کم‌تر از ۱۰۰ متر با امتیاز (۰/۴۱) بیش‌ترین ارتباط را با ایجاد آب‌های زیرزمینی داشته است در مقابل کلاس بیش از ۷۰۰ هیچ امتیازی کسب نکرده است. در پارامتر زمین‌شناسی تقریباً تمامی چاه‌های آب در سازند گچساران قرار گرفته است که بیانگر شرایط مساعد این سازند برای ذخیره آب می‌باشد. در پارامتر فاصله از گسل کلاس ۱۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ با امتیاز (۰/۸۳)، در کاربری اراضی، باغ با (۰/۷۷) امتیاز، در پارامتر عمق خاک، عمق بیش از ۵۰ متر و در پارامتر نفوذپذیری کلاس با نفوذپذیری بالا بیش‌ترین ارتباط را با ایجاد سفره‌های آب زیرزمینی داشته‌اند.

پس از انتخاب پارامترها، لایه‌های رستری ۱۵ پارامتر انتخابی با نقشه پراکنش چاه‌ها به‌منظور محاسبه وزن پارامترها با روش شاخص آنتروپی و وزن زیرکلاس‌ها با روش تابع شواهد قطعی همپوشانی گردید. نتایج حاصل از اجرای روش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. طبق نتایج حاصل از روش شاخص آنتروپی، پارامترهای فاصله از گسل، کاربری اراضی و لیتولوژی به‌ترتیب با کسب بالاترین وزن‌ها (۲/۸۰، ۱/۵، ۰/۳۲) بیش‌ترین تأثیر را در تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی داشته‌اند که با نتایج (۱ و ۴۰) مطابقت دارد. پارامترهای شیب، انحنای مقطع، نفوذپذیری، فاصله از آبراهه، شاخص توان آبراهه، تراکم آبراهه، بارندگی، جهت شیب، شاخص خیسی توپوگرافیک، عمق خاک و ارتفاع در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج حاصل از روش تابع شواهد قطعی، در پارامتر ارتفاع، کلاس کم‌تر از ۱۶۰۰ متر با وزن (۰/۲۶) بیش‌ترین ارتباط را با وجود آب‌های زیرزمینی داشته است در حالی‌که ارتفاع بالاتر از ۱۹۰۰ هیچ امتیازی را کسب نکرده است. ارتفاعات بالا رواناب بیش‌تری دارند در حالی‌که ارتفاعات کم‌تر تغذیه و نفوذ بیش‌تری دارند (۸). بر اساس پارامتر شیب، کلاس شیب ۴ تا ۸ درجه با امتیاز (۰/۵۱) ارتباط قوی با آب‌های زیرزمینی از خود نشان داده است در حالی‌که کلاس‌های بالاتر از این شیب هیچ امتیازی را کسب نکرده‌اند و دلیل آن افزایش رواناب در شیب‌های بالا می‌باشد که با نتایج (۱) مطابقت دارد. در پارامتر جهت‌شیب، جهت شمال‌غرب با کسب بیش‌ترین وزن (۰/۲) به‌علت دریافت میزان بارش و رطوبت بیش‌تر نسبت به جهات دیگر در کنترل ایجاد آب‌های زیرزمینی نقش بیش‌تری داشته است. بر اساس پارامتر انحنای توپوگرافیک، سطوح مقعر به‌علت شرایط مناسب توپوگرافیک بیش‌ترین تأثیر را در ایجاد منابع آب زیرزمینی داشته است. کلاس ۰/۲۵- تا ۰/۱۴- در

جدول ۲- نتایج حاصل از روش‌های تابع شواهد قطعی و شاخص آنتروپی.

Table 2. Results of EBF-Index of entropy model.

پارامترها Parameters	کلاس class	تعداد کل پیکسل‌ها No. of pixels in domain	تعداد چاه‌ها No. of wells	تابع شواهد قطعی Evidential belief function				شاخص آنتروپی Index-entropy		Wj
				BEL	DIS	UNC	PLS	(Pij)	Hj	
ارتفاع (متر) Elevation (m)	<1600	465454	19	0.26	0.13	0.60	0.87	0.26	0.15	-1.7
	1600 - 1650	322580	7	0.14	0.19	0.67	0.81	0.14	0.12	
	1650 - 1750	134613	4	0.19	0.17	0.64	0.83	0.19	0.14	
	1750 - 1850	109623	3	0.18	0.17	0.65	0.83	0.18	0.13	
	1850 - 1900	114767	4	0.23	0.17	0.61	0.83	0.23	0.15	
	>1900	59103	0	0.00	0.18	0.82	0.82	0.00	0.00	
شیب Slope	<2	499365	11	0.17	0.22	0.62	0.78	0.17	0.43	0.27
	2 - 4	462485	20	0.33	0.13	0.54	0.87	0.33	0.53	
	4 - 8	89500	6	0.51	0.15	0.34	0.85	0.51	0.50	
	8 - 16	14370	0	0.00	0.17	0.83	0.83	0	0	
	16 - 28	6337	0	0.00	0.17	0.83	0.83	0	0	
	>28	2355	0	0.00	0.17	0.83	0.83	0	0	
جهت شیب Aspect	هموار Flat	160136	6	0.12	0.11	0.77	0.89	0.12	0.36	0.04
	شمال North	138368	3	0.07	0.12	0.81	0.88	0.07	0.27	
	شمال شرق Northeast	150071	4	0.08	0.12	0.80	0.88	0.08	0.30	
	جنوب South	140492	5	0.11	0.11	0.78	0.89	0.11	0.35	
	جنوب غرب Southwest	118001	3	0.08	0.11	0.81	0.89	0.08	0.29	
	شرق East	71066	3	0.13	0.11	0.76	0.89	0.13	0.39	
	جنوب شرق Southeast	93309	1	0.03	0.12	0.85	0.88	0.03	0.17	
	غرب West	95106	5	0.17	0.11	0.73	0.89	0.17	0.43	
شمال غرب Northwest	109430	7	0.20	0.10	0.70	0.90	0.20	0.47		
انحنای توپوگرافیک Plan curvature	مقعر Concave	250588	10	0.41	0.31	0.28	0.69	0.41	0.53	0.01
	هموار Flat	785900	26	0.34	0.36	0.30	0.64	0.34	0.53	
	محدب Convex	39491	1	0.26	0.33	0.41	0.67	0.26	0.50	
انحنای مقطع Profile curvature	<-0.9	1693	0	0.00	0.20	0.80	0.80	0	0	0.18
	-0.9 - 0.25	384280	14	0.38	0.19	0.43	0.81	0.38	0.53	
	-0.25 - 0.014	511355	19	0.39	0.19	0.43	0.81	0.39	0.53	
	-0.014 - 0.7	176643	4	0.24	0.21	0.55	0.79	0.24	0.49	
	>0.7	2008	0	0.00	0.20	0.80	0.80	0	0	
بارندگی (میلی‌متر) Rain (mm)	<145	192203	10	0.30	0.18	0.52	0.82	0.30	0.52	0.04
	145 - 155	602219	18	0.17	0.23	0.60	0.77	0.17	0.44	
	155 - 165	81849	3	0.21	0.20	0.59	0.80	0.21	0.47	
	165 - 175	123652	5	0.23	0.19	0.57	0.81	0.23	0.49	
	>175	74003	1	0.08	0.21	0.72	0.79	0.08	0.29	

ادامه جدول ۲-۲

Continued Table 2.

پارامترها Parameters	کلاس class	تعداد کل پیکسل‌ها No. of pixels in domain	تعداد چاه‌ها No. of wells	تابع شواهد قطعی Evidential belief function				شاخص آنتروپی Index-entropy		Wj
				BEL	DIS	UNC	PLS	(Pij)	Hj	
شاخص نخیزی TWI	<10	99806	4	0.28	0.24	0.47	0.76	0.28	0.52	0.03
	10 - 12	246975	12	0.34	0.22	0.44	0.78	0.34	0.53	
	12 - 14	196071	4	0.14	0.27	0.58	0.73	0.14	0.40	
	>14	533127	17	0.23	0.27	0.51	0.73	0.23	0.49	
شاخص توان آبراهه SPI	<200	683620	21	0.17	0.19	0.64	0.81	0.17	0.43	0.11
	200 - 1000	191449	9	0.26	0.15	0.59	0.85	0.26	0.50	
	1000 - 2000	101104	3	0.16	0.17	0.67	0.83	0.16	0.42	
	2000 - 4000	56674	3	0.29	0.16	0.55	0.84	0.29	0.52	
	4000 - 8000	42093	1	0.13	0.17	0.71	0.83	0.13	0.38	
تراکم آبراهه Stream density	<0.5	98496	1	0.07	0.22	0.72	0.78	0.07	0.26	0.06
	0.5 - 1	161600	4	0.16	0.21	0.63	0.79	0.16	0.43	
	1 - 1.2	246129	13	0.35	0.17	0.48	0.83	0.35	0.53	
	1.2 - 1.4	347587	13	0.25	0.19	0.56	0.81	0.25	0.50	
	>1.4	222188	6	0.18	0.21	0.61	0.79	0.18	0.44	
فاصله از آبراهه Distance from river	<100	340680	18	0.41	0.15	0.44	0.85	0.41	0.53	0.16
	100 - 300	323263	13	0.31	0.19	0.50	0.81	0.31	0.52	
	300 - 500	252861	3	0.09	0.24	0.67	0.76	0.09	0.32	
	500 - 700	121233	3	0.19	0.21	0.60	0.79	0.19	0.46	
سنگ‌شناسی Lithology	>700	37963	0	0	0.21	0.79	0.79	0	0	0.32
	Kdzsh	569	0	0	0.16	0.84	0.84	0	0	
	Ksm,l	33267	1	0.39	0.16	0.46	0.84	0.39	0.53	
	Klso1	210602	1	0.06	0.19	0.75	0.81	0.06	0.25	
	TRjs	1588	0	0	0.16	0.84	0.84	0	0	
	TRn	4774	0	0	0.16	0.84	0.84	0	0	
	OMql	7183	0	0	0.16	0.84	0.84	0	0	
MIgs	818017	35	0.55	0.03	0.41	0.97	0.55	0.78		
فاصله از گسل Distance from fault	<3000	47833	2	0.05	0.11	0.84	0.89	0.05	0.22	2.80
	3000 - 6000	52952	2	0.05	0.11	0.84	0.89	0.05	0.21	
	6000 - 10000	38338	2	0.07	0.11	0.82	0.89	0.07	0.26	
	10000 - 15000	46851	31	0.83	0.02	0.15	0.98	0.83	0.22	
کاربری اراضی LU/LC	>15000	890026	0	0	0.65	0.35	0.35	0	0	1.15
	Urban شهر	175741	9	0.11	0.13	0.76	0.87	0.11	0.35	
	Range مرتع	290317	7	0.05	0.16	0.79	0.84	0.05	0.22	
	Roc صخره	2624	0	0	0.14	0.86	0.86	0	0	
	Bareland زمین بایر	16205	0	0	0.14	0.86	0.86	0	0	
	Orchard باغ	2789	1	0.77	0.14	0.10	0.86	0.77	0.29	
	Agriculture کشاورزی	583124	20	0.07	0.14	0.78	0.86	0.07	0.28	
	Agri-farming کشاورزی-دیم	3119	0	0	0.14	0.86	0.86	0	0	

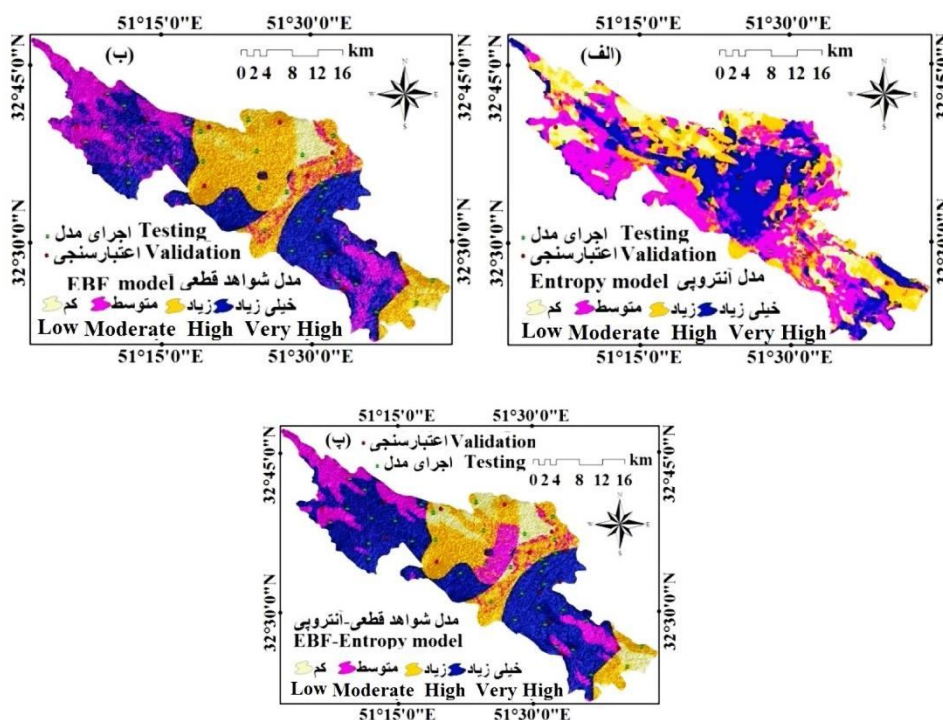
ادامه جدول ۲-

Continued Table 2.

پارامترها Parameters	کلاس class	تعداد کل پیکسل‌ها No. of pixels in domain	تعداد چاه‌ها No. of wells	تابع شواهد قطعی Evidential belief function				شاخص آنتروپی Index-entropy		Wj
				BEL	DIS	UNC	PLS	(Pij)	Hj	
عمق خاک Soil-depth	<15	105880	7	0.30	0.23	0.47	0.77	0.30	0.52	0.03
	15 - 30	123695	7	0.26	0.24	0.50	0.76	0.26	0.51	
	30 - 50	324758	10	0.14	0.31	0.54	0.69	0.14	0.40	
	>50	201898	13	0.30	0.22	0.49	0.78	0.30	0.52	
نفوذپذیری Infiltration	خیلی کم	24467	0	0	0.26	0.74	0.74	0	0	0.17
	کم	358854	10	0.25	0.27	0.47	0.73	0.25	0.50	
	متوسط	473781	17	0.33	0.24	0.43	0.76	0.33	0.53	
	زیاد	218898	10	0.42	0.23	0.35	0.77	0.42	0.53	

مقایسه روش ترکیبی با روش‌های انفرادی، نقشه پتانسیل با روش‌های شاخص آنتروپی (شکل ۴. الف) و تابع شواهد قطعی (شکل ۴. ب) نیز تهیه گردید. سپس، نقشه‌ها بر اساس شکست‌های طبیعی به ۴ کلاس پتانسیل خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی گردید.

پس از تعیین وزن پارامترها با روش شاخص آنتروپی و طبقات آن‌ها با روش تابع شواهد قطعی، در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2 از ترکیب وزن پارامترها و طبقات آن‌ها نقشه نهایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی حوضه نجف‌آباد حاصل گردید (شکل ۴. پ). به‌منظور



شکل ۴- نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی. الف. مدل آنتروپی، ب. مدل شواهد وزن قطعی، پ. مدل ترکیبی شواهد وزن قطعی- آنتروپی.

Figure 4. Groundwater potential map. A. Shanon entropy, b. EBF, C. EBF-Shanon entropy.

است. همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است نتایج مدل‌های انفرادی با مدل ترکیبی متفاوت می‌باشد، به‌گونه‌ای که در مدل‌های انفرادی تابع شواهد قطعی و شاخص آنتروپی به ترتیب ۳۱/۷۶ درصد و ۲۶/۹۷ درصد از منطقه مطالعاتی در کلاس پتانسیل خیلی‌زیاد قرار گرفته است، در حالی‌که این مقدار در روش ترکیبی ۴۵/۲۶ درصد می‌باشد، همچنین طبق شکل ۴، نحوه پراکنش کلاس‌های پتانسیل در سطح منطقه در مدل ترکیبی و مدل‌های انفرادی متفاوت می‌باشد که این موضوع را می‌توان به ساختار مدل‌های مورد استفاده و عدم قطعیت‌های موجود در شبیه‌سازی نسبت داد. نتایج حاصل از قدرت پیش‌بینی مدل‌ها با استفاده از مساحت زیرمنحنی در جدول ۴ و شکل ۶ و نتایج حاصل از دقت تفکیک طبقات با استفاده از شاخص سطح سلول هسته در جدول ۳ و شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مساحت زیرمنحنی نشان داد که سطح زیرمنحنی در مدل‌های شاخص آنتروپی، تابع شواهد وزن قطعی و مدل ترکیبی آنتروپی - شواهد وزن قطعی به ترتیب (۰/۴۳۱، ۰/۶۶۰ و ۰/۸۹۹) می‌باشد که بیانگر قدرت پیش‌بینی و دقت بالاتر مدل ترکیبی نسبت به مدل‌های دیگر می‌باشد که با نتایج حاصل از پژوهش‌هایی (۱۰، ۲۸، ۴۱ و ۴۲) که مدل‌های ترکیبی را دارای دقت بالاتری نسبت به مدل‌های انفرادی می‌دانند، مطابقت دارد. نتایج حاصل از دقت تفکیک طبقات نیز با شاخص SCAI نشان داد که هر سه مدل با دقت مناسبی به تفکیک طبقات پرداخته‌اند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی پتانسیل آب‌های زیرزمینی در حوضه نجف‌آباد با روش ترکیبی نشان داد که از کل منطقه مطالعاتی به مساحت ۹۶۶/۱۱ کیلومترمربع، ۹/۲۹ درصد (۸۹/۷۴ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل کم، ۱۹/۶۵ درصد (۱۸۹/۸۶ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل متوسط، ۲۵/۸ درصد (۲۴۹/۲۸ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل زیاد و ۴۵/۲۶ درصد (۴۳۷/۲۴ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل زیاد قرار گرفته است. عمدتاً قسمت‌های مرکزی منطقه مطالعاتی به سمت جنوب‌شرق و جنوب‌غرب دارای پتانسیل زیاد و خیلی‌زیاد می‌باشند که از مهم‌ترین علل آن می‌توان به نفوذپذیری و عمق خاک مناسب، تراکم آبراهه پایین، و شیب ملایم این مناطق اشاره نمود. مناطق با پتانسیل بالا عمدتاً در زمین‌های کشاورزی قرار گرفته‌اند. طبق نتایج حاصل از روش تابع شواهد قطعی، ۵/۵۲ درصد (۵۳/۳۴ کیلومترمربع) از منطقه مطالعاتی در کلاس پتانسیل کم، ۲۵/۳۰ درصد (۲۴۴/۴۷ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل متوسط، ۳۱/۷۶ درصد (۳۰۶/۷۹ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل زیاد و ۳۷/۴۲ درصد (۳۶۱/۵۱ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل خیلی‌زیاد قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از مدل شاخص آنتروپی، ۱۴/۶۵ درصد (۱۴۱/۵۸ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل کم، ۲۳/۵ درصد (۲۲۷/۰۱ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل متوسط، ۲۶/۹۷ درصد (۲۶۰/۵۶ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل زیاد و ۲۶/۹۷ درصد (۲۶۰/۵۶ کیلومترمربع) در کلاس پتانسیل خیلی‌زیاد قرار گرفته

جدول ۳- مقادیر شاخص سطح سلول هسته در کلاس‌های پتانسیل آب زیرزمینی.

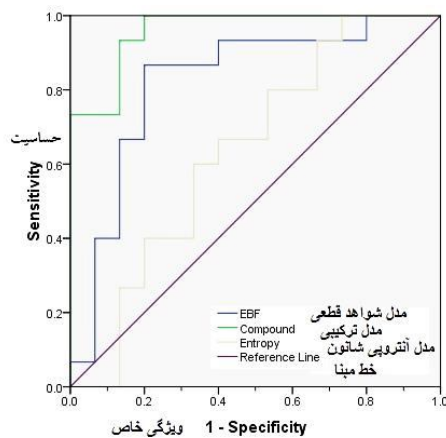
Table 3. Seed Cell Area Index (SCAI) of classes of groundwater potential.

کلاس‌های حساسیت Susceptibility classes	مساحت به کیلومتر مربع Area km ²	درصد مساحت Area%	تعداد چاه‌ها No. of wells	درصد تعداد چاه‌ها No. of wells %	SCAI
کم Low	89.74	9.29	2	5.41	0.0002
متوسط Moderate	189.86	19.65	4	10.81	0.0004
زیاد High	249.28	25.80	8	21.62	0.0007
خیلی زیاد Very High	437.24	45.26	23	62.16	0.0021
جمع Sum	966.11	100	37	100	
کم Low	53.34	5.52	2	5.41	0.0002
متوسط Moderate	244.47	25.30	6	16.22	0.0006
زیاد High	306.79	31.76	9	24.32	0.0008
خیلی زیاد Very High	361.51	37.42	20	54.05	0.0019
جمع Sum	966.11	100	37	100	
کم Low	141.58	14.65	4	10.81	0.0004
متوسط Moderate	227.01	23.50	7	18.92	0.0007
زیاد High	336.96	34.88	16	43.24	0.0015
خیلی زیاد Very High	260.56	26.97	10	27.03	0.0009
جمع Sum	966.11	100	37	100	

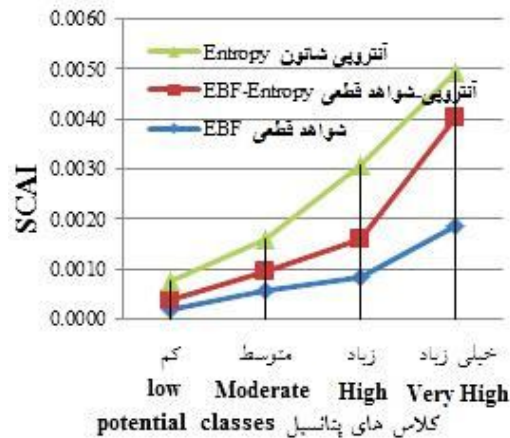
جدول ۴- مقادیر مساحت زیرمنحنی در مدل‌های مختلف.

Table 4. Area under curve in different models.

مدل‌ها models	مساحت area	خطای استاندارد Std. Error ^a	سطح معنی‌داری Asymptotic Sig	فاصله اطمینان ۹۵٪ Asymptotic 95% Confidence Interval	
				حد بالا Upper Bound	حد پایین Lower Bound
				شواهد وزن قطعی EBF	0.660
ترکیبی ensemble	0.899	0.000	0.031	0.960	
شاخص آنتروپی Index of entropy	0.431	0.206	0.104	0.636	



شکل ۶- روند سطح زیرمنحنی در مدل‌ها.
Figure 6. AUC Index trend in models.



شکل ۵- روند شاخص SCAI در مدل‌ها.
Figure 5. SCAI Index trend in models.

بالاترین امتیازات (۲/۸۰، ۱/۱۵ و ۰/۳۲) بیش‌ترین تأثیر را در کنترل ایجاد منابع آب زیرزمینی داشته‌اند و در مقابل پارامترهای ارتفاع، عمق خاک و شاخص خیسی توپوگرافیک به‌ترتیب با امتیازات (۱/۷-، ۰/۳۲ و ۰/۰۳) کم‌ترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی داشته‌اند. در حوضه آبخیز نجف‌آباد بر اساس مدل تابع شواهد قطعی، ۳۱/۷۶ درصد، مدل شاخص آنتروپی، ۲۶/۹۷ درصد و بر اساس مدل ترکیبی، ۴۵/۲۶ درصد از مساحت منطقه در کلاس پتانسیل آب زیرزمینی خیلی‌زیاد قرار گرفته است که منطبق بر سطوح مقعر و هموار و زمین‌های کشاورزی و باغات می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر وضعیت پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوضه نجف‌آباد می‌باشد که بیانگر وجود منابع آب زیرزمینی مناسب در این حوضه می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان اطلاعات پایه به برنامه‌ریزان و مسئولان محلی به‌منظور ارزیابی، برنامه‌ریزی، مدیریت، استفاده پایدار و تغذیه مصنوعی منابع آب زیرزمینی در آینده کمک نماید.

نتیجه‌گیری کلی

ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی یکی از پرکاربردترین زمینه‌های پژوهش در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد و پژوهشگران متعددی در این زمینه به پژوهش پرداخته‌اند. در این پژوهش به ارزیابی کارایی روش‌های ترکیبی داده‌محور در تهیه نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز نجف‌آباد پرداخته شده است. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که مدل ترکیبی شاخص آنتروپی- تابع شواهد قطعی به همراه تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی ابزار قوی به‌منظور ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی فراهم می‌نماید و همچنین مدل ترکیبی دارای قدرت پیش‌بینی بالاتری ۰/۸۹۹ (۸۹/۹ درصد) نسبت به مدل‌های انفرادی شاخص آنتروپی ۰/۴۳۱ (۴۳/۱ درصد) و مدل تابع شواهد قطعی ۰/۶۶۰ (۶۶ درصد) می‌باشد. مهم‌ترین مزیت مدل ترکیبی در این پژوهش استفاده از وزن پارامترها و طبقات آن‌ها در تعیین نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی می‌باشد. وزن‌های به‌دست آمده با استفاده از شاخص آنتروپی نشان داد که پارامترهای فاصله از گسل، کاربری اراضی و لیتولوژی به‌ترتیب با کسب

منابع

1. Al-Abad, A., Al-Temmeme, A., and 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 Resour. Manage.* 2: 3. 265-283.
2. Ayazi, M.H., Pirasteh, S., Arvin, A.K.P., Pradhan, B., Nikouravan, B., and Mansor, S. 2010. Disasters and risk reduction in groundwater: Zagros mountain southwest Iran using geo-informatics techniques. *Dis. Adv.* 3: 1. 51-57.
3. Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M.C., and Vlaicu, M. 2011. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environ. Earth Sci.* 63: 2. 397-406.
4. Chenini, I., and Mammou, A.B. 2010. Groundwater recharge study in arid region: an approach using GIS techniques and numerical modelling. *Comput. Geosci.* 36: 6. 801-817.
5. Chen, W., Pourghasemi, H.R., and Naghibi, S.A. 2017. Prioritization of landslide conditioning factors and its spatial modeling in Shangnan County, China using GIS-based data mining algorithms, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 23: 2. 1-19.
6. Dempster, A.P. 1968. Generalization of Bayesian inference. *J. R. Stat. Soc. Series B.* 30: 205-247.
7. Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Dhital, M.R., and Althuwaynee, F. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Nat. Hazards.* 65: 1. 135-165.
8. Davoodi Moghaddam, D., Rezaei, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S., and Pradhan, B. 2015. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arab. J. Geosci.* 8: 2. 913-929.
9. Ercanoglu, M., and Gokceoglu, C. 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environ Geol.* 41: 6. 720-730.
10. Guo-Liang, D., Yong-Shuang, Z., Javed, I., and Xin, Y. 2017. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China, *J. Mt. Sci.* 14: 2. 249-268.
11. Glenn, C.R. 2012. Lahaina Groundwater Tracer Study-Lahaina, Maui, Hawaii. Final Interim Report prepared from the State of Hawaii DOH, the U.S. EPA and the U.S. Army Engineer Research and Development Center.
12. Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H.R., Rezaeian, J., and Sattarian, A. 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11: 4. 909-926.
13. Jothibasu, A., and Anbazhagan, S. 2016. Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River basin of South India using analytic hierarchy process, *Model. Earth Syst. Environ.* 2: 109.
14. Lee, S., Hwang, J., and Park, I. 2013. Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea. *Catena.* 100: 15-30.
15. Lee, S., Song, K.Y., Kim, Y., and Park, I. 2012. Regional groundwater productivity potential mapping using a geographic information system (GIS) based artificial neural network model. *Hydrogeol. J.* 20: 1511-1527.
16. Lee, S., and Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression model. *Landslides.* 4: 1. 33-41.
17. Molden, D. 2007. Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture. Earthscan, London and International Water Management Institute, Colombo.
18. Magesh, N.S., Chandrasekar, N., and Soundranayagam, J.P. 2012. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geosci. Front.* 3: 2. 189-196.

19. Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Soleiman, W.N.A., and Ramli, M.F. 2012. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arab. J. Geosci.* 7: 2. 711-724.
20. Moore, I.D., Grayson, R.B., and Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydro. Process.* 5: 3-30.
21. Mirzapour, H., and Haghi Zadeh, A. 2017. Delineation of groundwater potential zones in Madian Roud watershed in Lorestan using Weighted Index Overlay Analysis (WIOA). *Hydrogeology.* 1: 83-98. (In Persian)
22. Mogaji, K.A., Lim, H.S., and Abdullah, K. 2014. Regional prediction of groundwater potential mapping in a multifaceted geology terrain using GIS-based Dempster-Shafer model. *Arab. J. Geosci.* 8: 5. 3235-3258.
23. Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S., and Rezaei, A. 2014. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *J. Earth Sci.* 8: 1. 171-186.
24. Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., and Dixon, B. 2016. Groundwater spring potential using boosted regression tree, classification and regression tree and random forest machine learning models in Iran. *Environ. Monit. Assess.* 188: 1. 44-64.
25. Nampak, H., Pradhan, B., and Manap, M.A. 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *J. Hydrol.* 513: 283-300.
26. Ozdemir, A., and Altural, T. 2013. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *J. Asia. Earth Sci.* 64: 180-197.
27. Pourghasemi, H.R., and Beheshtirad, M. 2014. Assessment of a data-driven evidential belief function model and GIS for groundwater potential mapping in the Koohrang Watershed, Iran. *Geocarto Int.* 30: 6. 662-685.
28. Pourghasemi, H.R., and Kerle, N. 2016. Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environ. Earth Sci.* 75: 185.
29. Page, M.L., Berjamy, B., Fakir, Y., Bourgin, F., Jarlan, J., Abourida, A., Benrhanem, M., Jacob, G., Huber, M., Sghrer, F., Simonneaux, V., and Chehbouni, G. 2012. An integrated DSS for groundwater management based on remote sensing. The case of a semi-arid aquifer in Morocco. *Water Resour. Manage.* 26: 3209-3230.
30. Pourtaghi, Z.S., and Pourghasemi, H.R. 2014. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birj and Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeol. J.* 22: 643-662.
31. Razandi, Y., Pourghasemi, H.R., Samani-Neisani, N., and Rahmati, O. 2015. Application of analytical hierarchy process, frequency ratio and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Sci. Inf.* 8: 4. 867-883.
32. Rahmati, O., Pourghasemi, H.R., and Melesse, A. 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.
33. Samy, I., Shattri, M., Bujang, B.K., and Ahmad, R.M. 2011. Structural geologic control with the limestone bedrock associated with piling problems using remote sensing and GIS: a modified geomorphological method. *Environ. Earth Sci.* 66: 8. 2185-2195.
34. Sharma, L.P., Patel, N., Ghose, M.K., and Debnath, P. 2010. Influence of Shannon's entropy on lands lide -causing parameters for vulnerability study and zonation-a case study in Sikkim, India. *Arab. J. Geosci.* 5: 3. 421-431.
35. Shafer, G. 1976. A mathematical theory of evidence, vol. 1. Princeton University, Princeton.
36. Shekhar, S., and Pandey, A.C. 2014. Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques. *Geocarto. Int.* 30: 4. 402-421.

37. Singh, P., Gupta, A., and Singh, M. 2014. Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *Egypt J. Rem. Sens. Space Sci.* 17: 111-121.
38. Tehrany, M.S., Pradhan, B., and Jebur, M.N. 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *J. Hydrol.* 504: 69-79.
39. Taheri, K., Gutierrez, F., Mohseni, H., Raeisi, E., and Taheri, M. 2015. Sinkhole susceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and magnitude-frequency relationships: a case study in Hamadan province, Iran. *Geomorphology.* 234: 64-79.
40. Thapa, R., Gupta, S., Guin, S., and Kaur, H. 2017. Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS: a case study from Birbhum district, West Bengal, *Appl. Water Sci.* 7: 7. 4117-4131.
41. Umar, Z., Pradhan, B., and Ahmad, A. 2014. Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. *Catena.* 118: 124-135.
42. Youssef, A.M., Pradhan, B., and Jebur, M.N. 2015. Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. *Environ. Earth Sci.* 73: 7. 3745-3761.
43. Yesilnacar, E.K. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, PhD Thesis. Department of Geomatics the University of Melbourne, 423p.
44. Zabihi, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S., and Behzadfar, M. 2016. GIS based multivariate adaptive regression spline and random forest models for groundwater potential mapping in Iran. *Environ. Earth Sci.* 75: 665.
45. Zabihi, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S., and Behzadfar, M. 2015. Groundwater Potential Mapping using Shannon's Entropy and Random Forest Models in the Bojnourd Township. *EcoHydrology.* 2: 221-232. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(2), 2018

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14021.2879

Simulation of Najaf-Abad watershed groundwaters using data driven ensemble model EBF-Index of entropy

***A.R. Arabameri¹, M. Sohrabi², Kh. Rezaei³, M. Yamani⁴ and K. Shirani⁵**

¹Ph.D. Student., Faculty of Literature and Humanities, Tarbiat Modarres University and Teacher of the Faculty of Earth Sciences, Damghan University, ²M.Sc. Faculty of Civil Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, ³Assistant Prof., Faculty of Sedimentology, University of Kharazmi, ⁴Professor, Faculty of Geography, University of Tehran, ⁵Assistant Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

Received: 10.04.2017; Accepted: 05.05.2018

Abstract

Background and Objectives: Ground waters considered as the main source of future water supply for drinking, irrigation and food production due to global climate changes. At present, aquifers around the world are under pressure to meet the growing demands of water due to population growth. Management of groundwater reserves in a sustainable manner is a major challenge. The goal of groundwater resource assessment is to provide information on the current status of the resource and provide insights about the future availability of groundwater. In recent years, several authors have attempted to assess groundwater potential using different data-driven and knowledge-driven techniques associated with remote sensing (RS) and geographic information system (GIS). The main objective of this research is identification of effective parameters in groundwater recharge and assessment of groundwater potential using data-driven ensemble method in Najaf-Abad aquifer watershed.

Materials and Methods: The study area lies between 32° 18' 06" - 32° 50' 12" eastern latitude and 50° 52' 46" - 51° 41' 48" northern longitude. In this research, six steps implemented to map groundwater potential using ensemble approaches including: 1- preparing groundwater well inventory map and dividing into two sets: training and testing. 2- Building the database. In this step layers of groundwater occurrence factors were prepared using different resources such as field survey and Remote Sensing. All thematic layers converted to raster format to use in further analysis. 3- multicollinearity checking among factors and selection of conditioning factors using tolerance (TOL) and variance inflation factor (VIF) indicators. 4- Computing the relationship between training well locations and groundwater conditioning factors using entropy index model and their classes using evidential belief function model. 5-The groundwater potential mapping and classification into four classes using Natural Break scheme 6- Validation of the results using area under curve (AUC) and seed cell area index (SCAI).

Results: The results of the multicollinearity analysis among 21 geo-environmental factors influence on groundwater occurrences used in this study showed that the Tolerance and VIF of 15 variables were ≥ 0.1 and ≤ 10 , respectively. As a result, these parameters were selected for simulation. The computed weights for each factor using index of entropy model, indicated that the most influencing factors on groundwater occurrence in the study area were distance from fault, LU/LC and geology. According to the ensemble model, 45.26% of the aquifer has a very high potential. The results of validation of models indicated that the AUC for EBF, index of entropy and EBF-index of entropy models were 0.660, 0.431 and 0.899, respectively, indicating

* Corresponding Author; Email: alireza.ameri91@yahoo.com

higher predictive accuracy of ensemble model. According to the results of the SCAI, the values of this indicator were appropriate for all three models.

Conclusion: The main conclusion of this study is that the ensemble approach of EBF-Index of entropy associated with RS and GIS technologies provides a powerful tool for groundwater potential mapping in the study area. The areas covered by very high groundwater potential are 45.26% of the total area, indicating that the study area has a high groundwater potential. The results of this research can be used for effective management of groundwater resources in the study area.

Keywords: Simulation of groundwater, Geo-environmental parameters, Ensemble approach, Najaf-Abad