

مقاله علمی-پژوهشی

تعیین مناطق مستعد آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های SI، WOE و Shannon (مطالعه موردی: لنجان‌ات اصفهان)

حسن ترابی پوده^{۱*}، بابک شاهی نژاد^۲، یزدان یاراحمدی^۳، آزاده ارشیا^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵

چکیده

شناسایی مناطق مستعد آب زیرزمینی از موارد مهم و ضروری در مدیریت منابع آب هر کشوری به‌ویژه کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. در این پژوهش، نقشه پهنه‌بندی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های SI، WOE، Shannon در بستر ArcGIS 10.5 ارائه شد. بدین منظور موقعیت جغرافیایی ۶۲۴ چاه با دبی بیشتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه در منطقه به دو گروه واسنجی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند. در اجرای هر سه مدل از پارامترهای مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی شامل: ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، خاک‌شناسی، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از گسل، تراکم گسل، تراکم آبراهه و فاصله از آبراهه استفاده شد. برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌ها از منحنی ROC در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. بیشترین صحت برای این منطقه به مدل شاخص آماری اختصاص داشت که مقدار AUC برای این مدل، ۸۴/۵ درصد و بعد از آن به ترتیب مدل‌های وزن شواهد با ۸۱/۶ و آنتروپی شانون با ۸۰/۶ درصد قرار دارند. بیش از ۶۰ درصد منطقه دارای پتانسیل آب زیرزمینی متوسط تا خیلی زیاد است. مدل شاخص آماری برای این منطقه مناسب‌تر و با دقت خوب است. تعیین مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مذکور برای اجرای برنامه‌های مدیریتی، مناسب است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آنتروپی شانون، شاخص آماری، لنجان‌ات، وزن شواهد

مقدمه

شناسایی مناطق دارای آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع مهم برای تأمین آب آشامیدنی، کشاورزی، تنوع اکولوژیکی و صنایع مختلف از موارد مهم و ضروری در مدیریت منابع آب محسوب می‌شود (Jothibas et al., 2016). تشخیص مناطق بالقوه آب زیرزمینی از الزامات اصلی در محافظت و مدیریت آب زیرزمینی است. این نقشه‌ها به‌ویژه برای مهندسان و طراحانی بسیار مفید است که در جست‌وجوی مکان‌های مناسب برای استخراج این منابع هستند (Oh

et al., 2011). روش‌های بسیاری برای نیل به این هدف وجود دارد که در سال‌های اخیر، بیش‌ازپیش موردتوجه و بررسی قرار گرفته‌اند. در این میان، روش‌های مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، سبب افزایش دقت و سرعت بررسی‌ها در زمینه منابع آب زیرزمینی شده‌اند. در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران بسیاری به استفاده از روش‌های مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجش‌ازدور و یادگیری ماشینی و روش‌های آماری، معطوف شده است (Chen et al., 2018). زیرا این روش‌ها الگوهای پنهان در آب‌های زیرزمینی را شناسایی می‌کنند و رابطه غیرخطی بین متغیرها را به دست می‌آورند (Mogaji and Lim, 2018). روش‌های احتمالی (Chenini et al., 2010). تصمیم‌گیری چندمعیاره (Jothibas et al., 2016). روش‌های مختلف ماشینی شامل وزن شواهد و درخت توابع (Chen et al., 2018)، حداکثر آنتروپی (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۵) و روش‌های آماری دمپستر شافر (حقی زاده و همکاران، ۱۳۹۶)، نسبت فراوانی (Lee et al., 2019) و بسیاری موارد دیگر در تعیین مناطق احتمالی وجود آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عوامل مختلفی در

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران
۳- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۴- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: torabi.ha@lu.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.5.3.1

را با روش نسبت فراوانی انجام دادند و این مدل برای منطقه دارای صحت ۸۵ درصد و مناسب منطقه بود. شفیی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی با استفاده از ۹ عامل مؤثر، پتانسیل آب زیرزمینی را با استفاده از روش آنتروپی شانون در نورآباد ممسنی بررسی کردند و با استفاده از منحنی ROC این مدل را برای این منطقه، مناسب ارزیابی کردند. یونسی و همکاران (۱۳۹۹) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی را در محدوده نجف‌آباد اصفهان با استفاده از مدل‌های شاخص آماری و وزن شواهد، مورد بررسی قرار دادند و از ۱۰ عامل مؤثر برای رسیدن به نقشه نهایی استفاده کردند که دقت مدل شاخص آماری بالاتر بود و در نتیجه برای تهیه نقشه پتانسیل در این منطقه، مناسب‌تر بود. فرامرزی و همکاران (۱۳۹۸) به پهنه‌بندی وقوع مخاطره سیلاب در پارک ملی گلستان با مدل‌های جنگل تصادفی، آنتروپی شانون و درخت رگرسیون تقویت‌شده پرداختند و دقت این مدل‌ها با استفاده از روش منحنی ROC بررسی شدند. نتایج مدل‌ها برای این منطقه، اهمیت زیاد ارتفاع از سطح دریا، فاصله از آبراهه، بارش و فاصله از جاده را در وقوع مخاطره سیل نشان دادند. یوسفی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به پتانسیل یابی مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل‌های SI، FR و Shannon و ارائه نقشه پهنه‌بندی در این حوضه پرداختند. بیشترین صحت برای این منطقه به مدل آنتروپی شانون (۰/۸۲)، خیلی خوب) اختصاص داشت و بعد از آن، مدل نسبت فراوانی و شاخص آماری (۰/۷۸)، مناسب این منطقه معرفی شدند.

در این مطالعه به تعیین نقشه نهایی مناطق مستعد آب زیرزمینی در بستر نرم‌افزار ArcGIS 10.5 و مدل‌های شاخص آماری (SI) و آنتروپی شانون (Shannon) و وزن شواهد (WOE) برای محدوده لنجانان اصفهان پرداخته می‌شود.

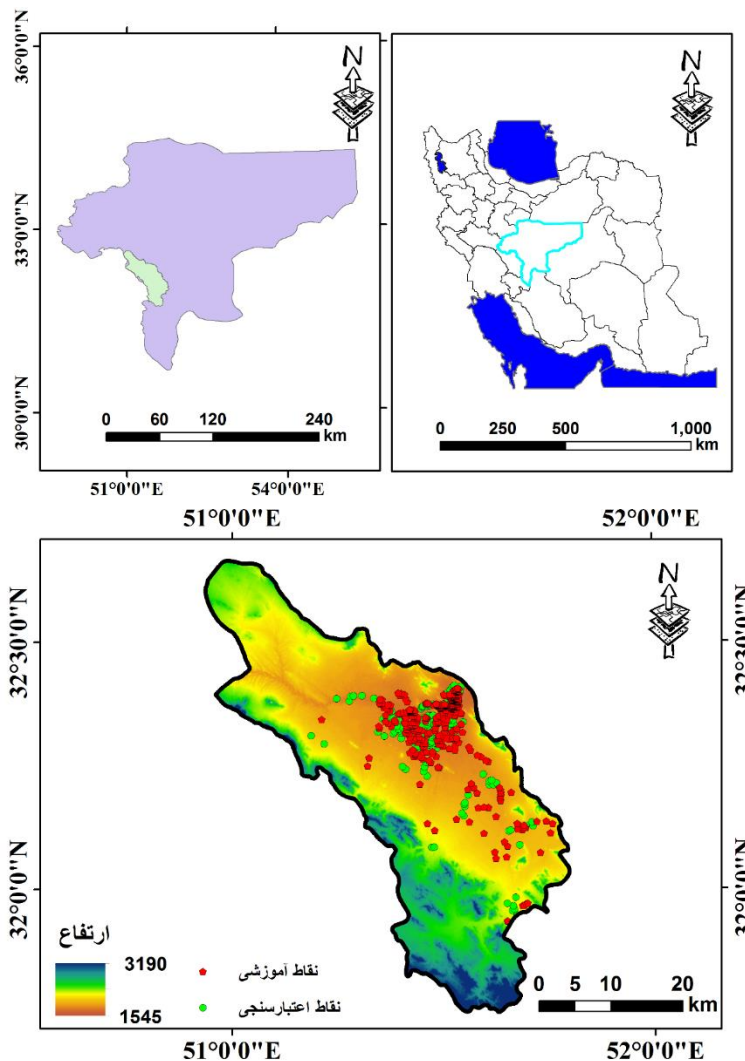
مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی لنجانان در جنوب غرب استان اصفهان واقع شده است. ارتفاع نسبی آن از سطح دریا ۲۲۷۰ متر است و دارای آب و هوایی متغیر است که همواره تحت تأثیر ناحیه نیمه‌خشک مرکزی و نیمه مرطوب چهارمحال بختیاری قرار می‌گیرد. این شهرستان از شرق به شهرستان فلاورجان و از شمال شرق به نجف‌آباد و از شمال به تیران و کرون و از غرب به شهرکرد و بروجن در استان چهارمحال بختیاری و از جنوب به شهرستان مبارکه محدود می‌شود. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است.

تعیین مناطق مستعد آب زیرزمینی اثرگذارند که در مطالعات اخیر نیز بسته به مطالعه پژوهشگران از موارد مختلفی استفاده شده است. از جمله این عوامل: شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم آبراهه، کاربری اراضی، ارتفاع، انحنا سطح، تراکم گسل، خاک لیتولوژی و شاخص توان آبراهه می‌باشند (Thapa et al., 2017) و (گلکاریان و رحمتی، ۱۳۹۷). بدون استفاده از یک سیستم توانمند که توانایی استفاده از لایه‌های مختلف مؤثر و تجزیه و تحلیل را داشته باشد، حل این معضل امکان‌پذیر نیست. سیستم اطلاعات جغرافیایی به دلیل توانایی بالا در مدیریت حجم عظیمی از داده‌ها، مناسب این مطالعات است (Sener et al., 2006).

از جمله پژوهش‌های صورت گرفته شامل: فریج و همکاران به بررسی سفره آبخوان Paluxy در شمال مرکز تگزاس با هدف توسعه روش مدل‌سازی پیش‌بینی و ارزیابی حساسیت آب‌های زیرزمینی به آلودگی و سپس مقایسه این ارزیابی حساسیت با داده‌های شیمی آب جمع‌آوری‌شده از چاه‌های مکمل در آبخوان پرداختند. بر اساس متغیرهایی مانند کاربری زمین، پوشش زمین، نفوذپذیری خاک، عمق آب، هدایت هیدرولیکی آبخوان و توپوگرافی، اهمیت نسبی هر یک از متغیرها در حساسیت آلودگی آب‌های زیرزمینی تعیین شده است. وزن هر متغیر شامل یک لایه نقشه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. این لایه‌های نقشه با هم ترکیب می‌شوند تا نقشه حساسیت نهایی را تنظیم کنند. با استفاده از این روش، نقشه حساسیت به آلودگی ۳۲ درصد از منطقه را دارای حساسیت کم آلودگی، ۴۱ درصد را به‌عنوان حساسیت متوسط، ۲۵٪ حساسیت بالا و ۲٪ حساسیت آلودگی بسیار بالا طبقه‌بندی می‌کند (Fritch et al., 2002). مفیدی فر و همکاران (۱۳۹۴)، در پژوهشی به مقایسه مدل‌های TOPSIS و تحلیل سلسله مراتبی و همچنین سیستم اطلاعات جغرافیایی برای پتانسیل یابی آب زیرزمینی در حوضه یزد- اردکان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش تحلیل سلسله مراتبی برای این منطقه مناسب‌تر از تاپسیس است. فلاح و همکاران (۱۳۹۶)، پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی خرم‌آباد لرستان را با روش شاخص آماری بررسی کردند و در نهایت برای تعیین صحت نقشه نهایی از منحنی ROC استفاده کردند. دقت نقشه نهایی ۸۲ درصد شد و در نتیجه این مدل را مناسب منطقه، معرفی کردند. عرب عامری و همکاران (۱۳۹۷)، در پژوهشی، پتانسیل آب زیرزمینی حوضه نجف‌آباد را با استفاده از مدل‌های شواهد قطعی، شاخص آنتروپی و مدل ترکیبی این دو روش، بررسی کردند و اعتبارسنجی نتایج را با استفاده از مساحت زیر منحنی AUC و شاخص سطح سلول هسته‌ای انجام دادند. نوحانی و همکاران (۱۳۹۷) پتانسیل آب زیرزمینی دشت الشتر



شکل ۱- موقعیت مکانی و نقاط آموزشی و اعتبارسنجی - لنجانان اصفهان

پیکسل هر کلاس، $\sum Npix (Fi)$ مجموع نقاط در هر کلاس و $Npix$ ($\sum Ni$) مجموع پیکسل‌ها در هر کلاس هست. در این روش وزن کم هر طبقه بیانگر کم بودن تعداد وقوع چاه در آن طبقه است و بالعکس. طبقات با ارزش وزنی صفر بیانگر عدم وجود چاه در آن طبقه است. در نهایت وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس در نرم‌افزار ArcGIS10.5 در تمامی لایه‌ها اعمال و سپس با به‌کارگیری توابع روی هم گذاری و ماشین حساب رستری، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شد.

مدل آنتروپی شانون

آنتروپی معیار سنجش بی‌نظمی در یک سیستم است و در تئوری اطلاعات معیاری است برای مقدار عدم اطمینان ارائه‌شده توسط یک توزیع احتمال گسسته (Pi) به‌نحوی که این عدم اطمینان در صورت پخش بودن توزیع، بیشتر از مواردی است که توزیع فراوانی تیزتر باشد

مدل شاخص آماری

مدل شاخص آماری از مدل‌های داده‌کاوی است که در مطالعات مختلف پیش‌بینی مکانی بکار رفته است (Bui et al., 2011). این مدل در مدل‌سازی و پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی و همچنین سیل به تجزیه و تحلیل روابط بین عوامل محیطی و وقایع می‌پردازد. وزن هر یک از کلاس‌های عوامل محیطی بر اساس رابطه (۱) تعیین می‌گردد:

$$Si = \ln \left[\frac{\left(\frac{Npix (fi)}{Npix (Ni)} \right)}{\frac{\sum Npix (fi)}{\sum Npix (Ni)}} \right] \quad (1)$$

که در آن Fi فراوانی نقاط (چاه) در هر کلاس و Ni فراوانی

$$W^- = \ln \left\{ \frac{p(\bar{B}|A)}{P(\bar{B}|\bar{A})} \right\} \quad (۸)$$

$$C = W^+ - W^- \quad (۹)$$

که در اینجا P احتمال با پایه‌ی لگاریتمی است. ضرایب B و \bar{B} به ترتیب حضور و عدم حضور عامل شرطی و A و \bar{A} حضور و عدم حضور پدیده است (Xu et al., 2012). وزن منفی (W^-) بیانگر عدم حضور عامل شرطی در موقعیت مکانی پدیده و وجود رابطه‌ی منفی بوده و در مقابل وزن مثبت (W^+) بیانگر حضور عامل شرطی در موقعیت مکانی پدیده بوده و مقدار این وزن، همبستگی بین آن عامل و وجود چاه را بیان می‌کند. اختلاف میان دو وزن مثبت و منفی تفاوت وزنی میان عامل شرطی و وقوع چاه را نشان می‌دهد (Dahal et al., 2008). ضریب C در صورت وجود رابطه‌ی مثبت دارای مقدار مثبت و در صورت وجود رابطه‌ی منفی مقدار منفی است. انحراف معیار W از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$S(C) = \frac{S^2(W^+) + S^2(W^-)}{\sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)}} \quad (۱۰)$$

که مؤلفه‌های $S^2(W^+)$ و $S^2(W^-)$ به ترتیب واریانس وزن‌های مثبت و منفی است. واریانس وزن‌ها می‌تواند به‌وسیله‌ی روابط زیر محاسبه شود (Bonham et al., 1988).

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N\{B \cap A\}} + \frac{1}{B \cap \bar{A}} \quad (۱۱)$$

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N\{\bar{B} \cap A\}} + \frac{1}{\bar{B} \cap \bar{A}} \quad (۱۲)$$

اختلاف استیودنت میزان اختلاف C با صفر نشان می‌دهد که اگر این اختلاف دارای مقدار کم و یا نزدیک به صفر باشد، می‌توان گفت به احتمال زیاد اختلاف واقعی است (Regmi et al., 2013). اختلاف استیودنت (W_{final}) یک روش اندازه‌گیری اطمینان است که از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{final} = \left(\frac{C}{S(C)} \right) \quad (۱۳)$$

برای محاسبه وزن نهایی هر عامل، وزن‌های مثبت و منفی کلاس‌های متعدد هر عامل با هم جمع می‌شوند. اگر وزن عاملی مثبت باشد در وقوع چاه ایفاگر نقش بوده و در صورتی که وزن عاملی منفی باشد، عدم اثر عامل در بروز این پدیده را نشان می‌دهد. برخی از عوامل هم تأثیر ناچیزی در وقوع چاه داشته که وزن آن‌ها صفر و یا نزدیک به صفر می‌باشد. با وارد کردن وزن‌ها در محیط ArcGIS 10.5 بر روی نقشه‌های موضوعی، نقشه‌های موضوعی وزنی تهیه می‌شوند که از مجموع این نقشه‌ها، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حاصل می‌شود. در نهایت نقشه پتانسیل آب زیرزمینی بر اساس روش

(Bednarik et al., 2010). از مهم‌ترین مزیت‌های این روش می‌توان به در نظر گرفتن تعداد زیادی شاخص کمی و کیفی به‌طور هم‌زمان در ارزیابی پتانسیل، سهولت و سادگی کاربرد، امکان تغییر اطلاعات ورودی و ارائه پهنه‌بندی جدید بر اساس این اطلاعات، نتایج حاصله به‌صورت ضریب اولویت بیان می‌شود که این مقادیر وزن نهایی راهبردها در اولویت‌بندی است، در نظر گرفتن توأمان ارزش هر شاخص در هر واحد کاری و اولویت شاخص‌ها نسبت به هم که باعث دستیابی به نتایج با ضریب اطمینان بیشتر می‌گردد. در آنتروپی، متغیرهایی با حداکثر تأثیر در وقوع یک رخداد تعیین و مشخص می‌شود. روابط زیر موجب دستیابی به میزان اثرگذاری عوامل مؤثر در تعیین نقشه پتانسیل می‌گردد (روابط ۲ تا ۶):

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} P_{ij}} \quad (۲)$$

$$(H_j) = \sum_{j=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), \quad j=1, \dots, n \quad (۳)$$

$$H_{j \max} = \log_2 S_j, \quad S_j - \text{Number of Class} \quad (۴)$$

$$I_j = \frac{H_{j \max} - H_j}{H_{j \max}}, \quad I = (0,1), j=1, \dots, n \quad (۵)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad (۶)$$

که در آن P_{ij} تراکم نقاط (P_{ij}) احتمال وجود نقاط چاه در هر عامل و کلاس مربوط به آن، در هر طبقه H_j و $H_{j \max}$ مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات و W_{ij} وزن نهایی هر عامل را مشخص می‌کند. پس از تعیین وزن نهایی با ضرب وزن آن در کلاس همان عامل یعنی مقدار P_{ij} مربوط به هر عامل و کلاس آن عامل بر اساس تقسیم تعداد نقاط چاه بر تعداد پیکسل‌های کلاس‌های عوامل نقشه‌های وزنی باهم جمع شده و نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شد.

مدل وزن شواهد (Weights-of-evidence)

این روش بر پایه‌ی انحراف معیار با ترکیب اطلاعات برای پیش‌بینی وقوع حوادث، زمانی که داده‌های در دسترس به حد کافی برای ارزیابی اهمیت نسبی لایه‌ها با میانگین آماری وجود دارد به کار برده می‌شود. با استفاده از نقشه‌های پایه با تفکیک مکانی ۳۰ متر، وزن‌های منفی (W^-) و مثبت (W^+) برای هر پارامتر اساسی محاسبه می‌شود، روش اندازه‌گیری وزن برای هر عامل بر اساس حضور (B) یا عدم حضور پدیده (A) در منطقه با روابط زیر محاسبه می‌شود (Bonham et al., 1988).

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{p(B|A)}{P(B|\bar{A})} \right\} \quad (۷)$$

ارائه شده است.

نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی

بر اساس وزن محاسبه شده برای هر یک از کلاس‌های عوامل اثرگذار، نقشه پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی به دست آمده و نهایتاً نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 به پنج کلاس با پتانسیل وقوع خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد کلاس‌بندی شده و در شکل (۴) ارائه شده است. نقشه هم‌پوشانی چاه‌ها با نقشه‌های حاصل از مدل نیز در شکل (۵) ارائه شده است.

اعتبارسنجی نقشه

به منظور اعتبارسنجی نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی از مجموعه‌ای از داده‌هایی که در مدل‌ها به کار گرفته نشده‌اند، استفاده می‌شود. در این بخش برای محدوده مطالعاتی لنجان، نقشه ۲۰۸ مورد چاه که در پتانسیل‌یابی استفاده نشده‌اند با نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مذکور روی هم‌گذاری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. سپس برای اعتبارسنجی دقت نقشه نهایی از روش منحنی ROC^۱ استفاده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار SPSS، منحنی ROC مربوط به نقشه پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی لنجان تهیه شد. مساحت زیر این منحنی (AUC)^۴، بیانگر میزان دقت نقشه نهایی به صورت کمی است. سطح زیرپوشش هر نمودار بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی درست است. در بهترین شرایط و یک حالت ایده آل، مقدار زیر نمودار برابر یک خواهد بود. این شاخص، یک شاخص مناسب برای ارزیابی صحت مدل است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶). همان‌گونه در شکل (۶) مشاهده می‌شود، مساحت زیر منحنی مذکور (AUC) برای هر سه مدل آمده است.

نتیجه‌گیری

افزایش جمعیت و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی باعث کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های اخیر گردیده است. به دلیل بالا بودن حجم اطلاعات به واسطه تعدد عوامل مختلف اثرگذار در ایجاد پتانسیل آب زیرزمینی، استفاده از روش‌های مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی با توجه به سرعت پردازش و مدیریت مناسب لایه‌ها، ابزاری مناسب برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی است. روش‌های متعددی برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی نظیر روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و همپوشانی به کار برده می‌شود. از معایب این روش‌ها در مقایسه با روش شواهد وزنی می‌توان به اثرگذاری نظر کارشناسان بر نتیجه‌ی کار اشاره کرد.

طبقه‌بندی کوانتایل به چهار طبقه تقسیم شده و نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی در پهنه‌هایی با حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد، ارائه می‌گردد.

اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی

به منظور اعتبارسنجی نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی از مجموعه‌ای از داده‌هایی که در مدل بکار گرفته نشده‌اند، استفاده می‌شود. در این بخش برای محدوده مطالعاتی لنجان، نقشه ۲۰۸ مورد چاه که در پتانسیل‌یابی استفاده نشده‌اند با نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مذکور روی هم‌گذاری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. سپس برای اعتبارسنجی دقت نقشه نهایی از روش منحنی ROC^۱ استفاده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار SPSS، منحنی ROC مربوط به نقشه پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی لنجان تهیه شد. مساحت زیر این منحنی (AUC)^۴، بیانگر میزان دقت نقشه نهایی به صورت کمی است. سطح زیرپوشش هر نمودار بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی درست است. در بهترین شرایط و یک حالت ایده آل، مقدار زیر نمودار برابر یک خواهد بود. این شاخص، یک شاخص مناسب برای ارزیابی صحت مدل است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶).

حساسیت سنجی

تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی وزن شواهد با روش حذفی انجام می‌شود. در هر مرحله، یکی از متغیرهای ورودی مدل (ارتفاع، جهت شیب، شیب، انحنای سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از رودخانه، تراکم گسل، فاصله از گسل، تراکم رودخانه، خاک، سنگ و کاربری اراضی) حذف می‌شود و نقشه تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی هر بار بر پایه‌ی فقط بازده متغیر باقیمانده تهیه شد و دقت پیش‌بینی مدل در هر حالت برای مدل‌های روش شاخص آماری، وزن شواهد و آنتروپی شانون محاسبه شد.

نتایج و بحث

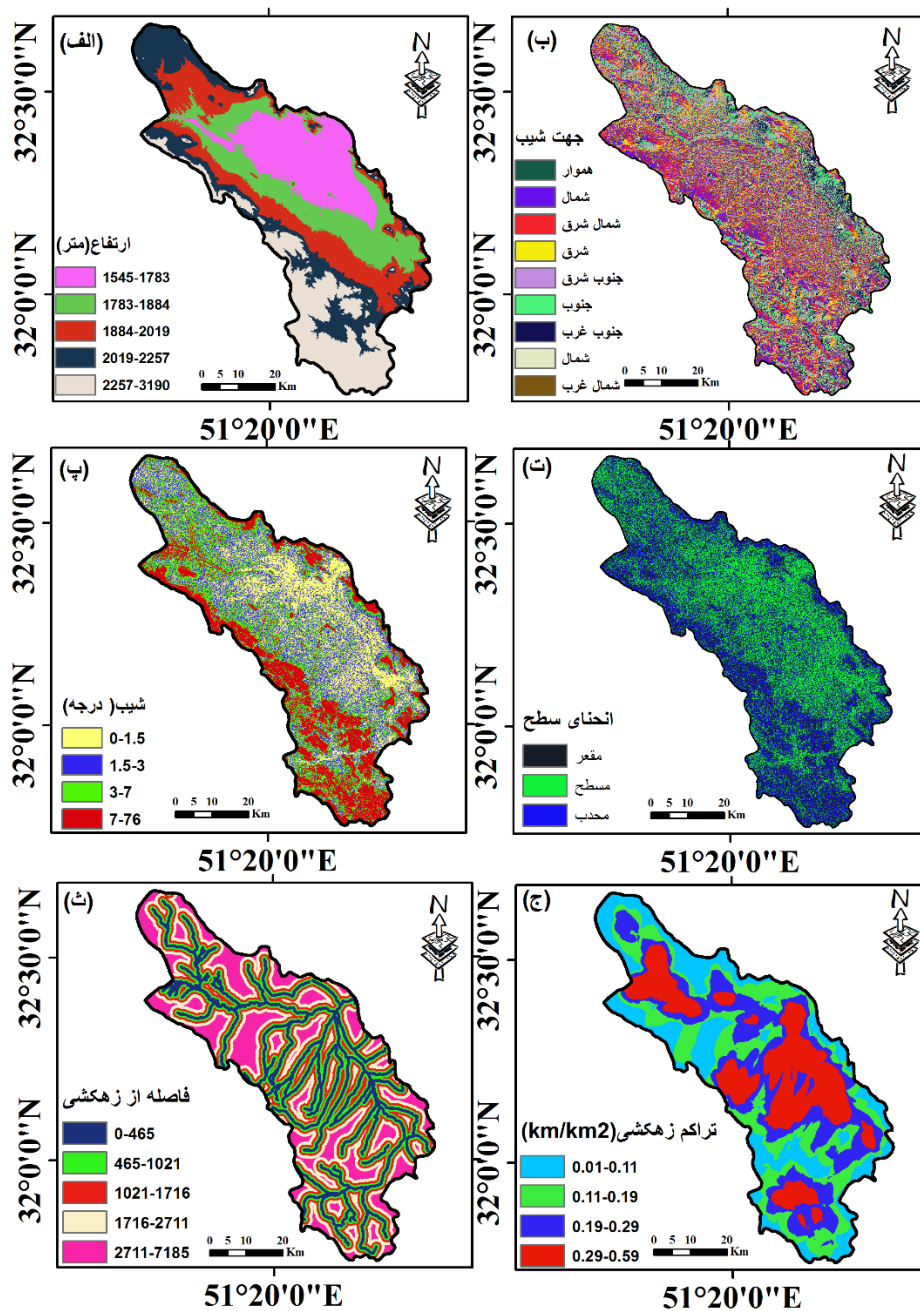
تهیه نقشه‌های عوامل ورودی مدل‌های شاخص آماری، وزن شواهد و آنتروپی شانون نقشه‌های عوامل ورودی مدل‌های شاخص آماری، وزن شواهد و آنتروپی شانون شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، تراکم گسل، سنگ‌شناسی، خاک، کاربری اراضی و شاخص رطوبت توپوگرافی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد و در شکل‌های (۲) و (۳)

3-Receiver Operating Characteristic: ROC

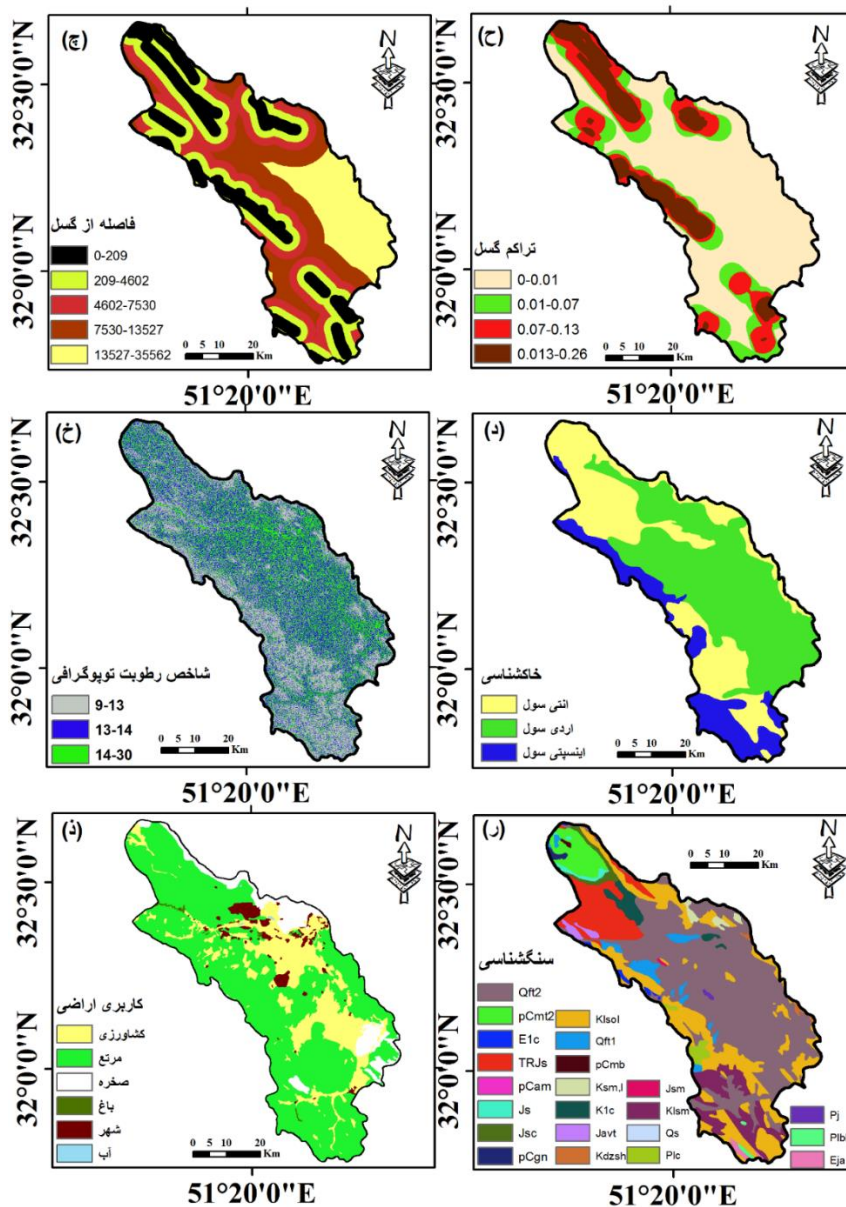
4- Area Under Curve: AUC

1- Receiver Operating Characteristic: ROC17

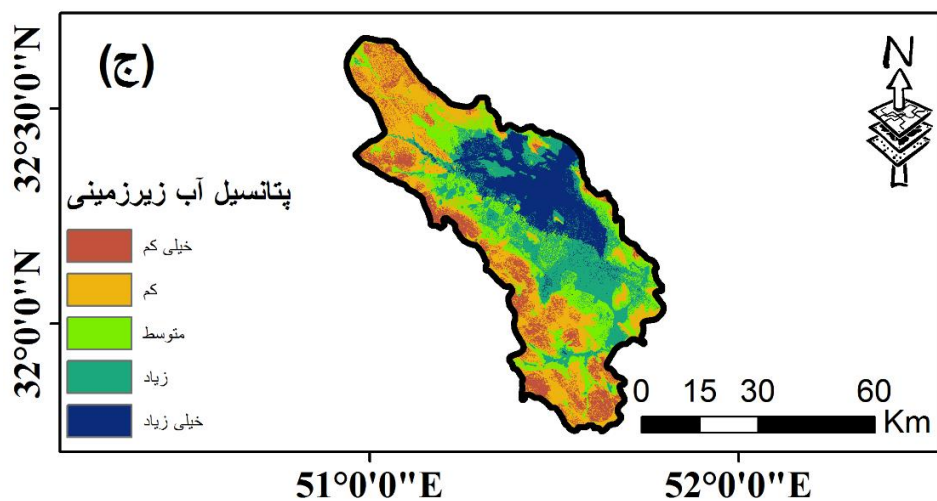
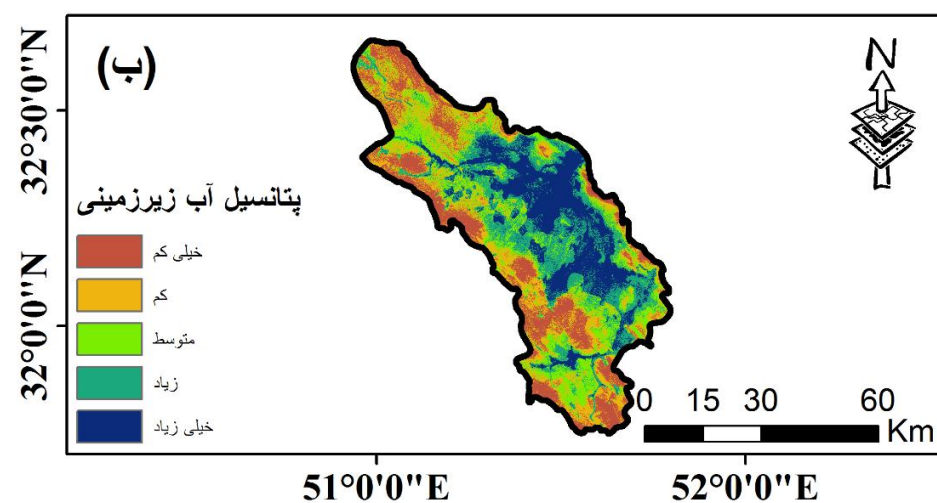
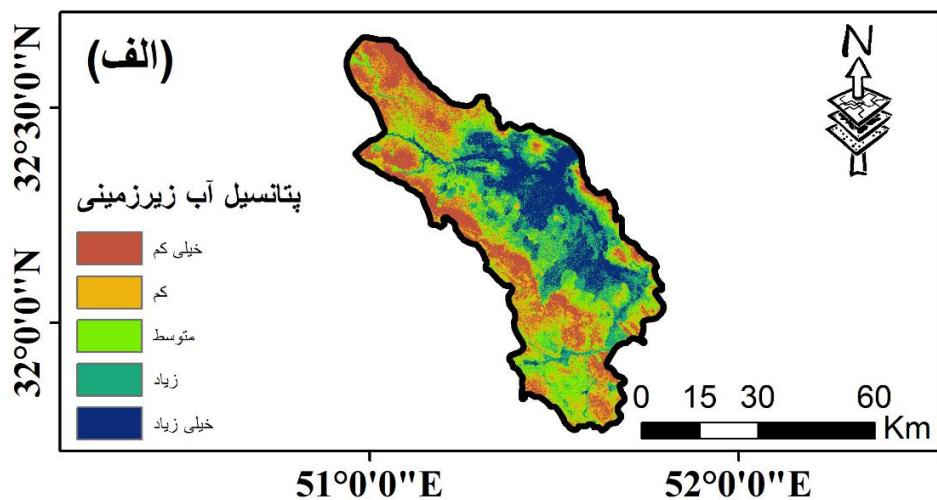
2- Area Under Curve: AUC18



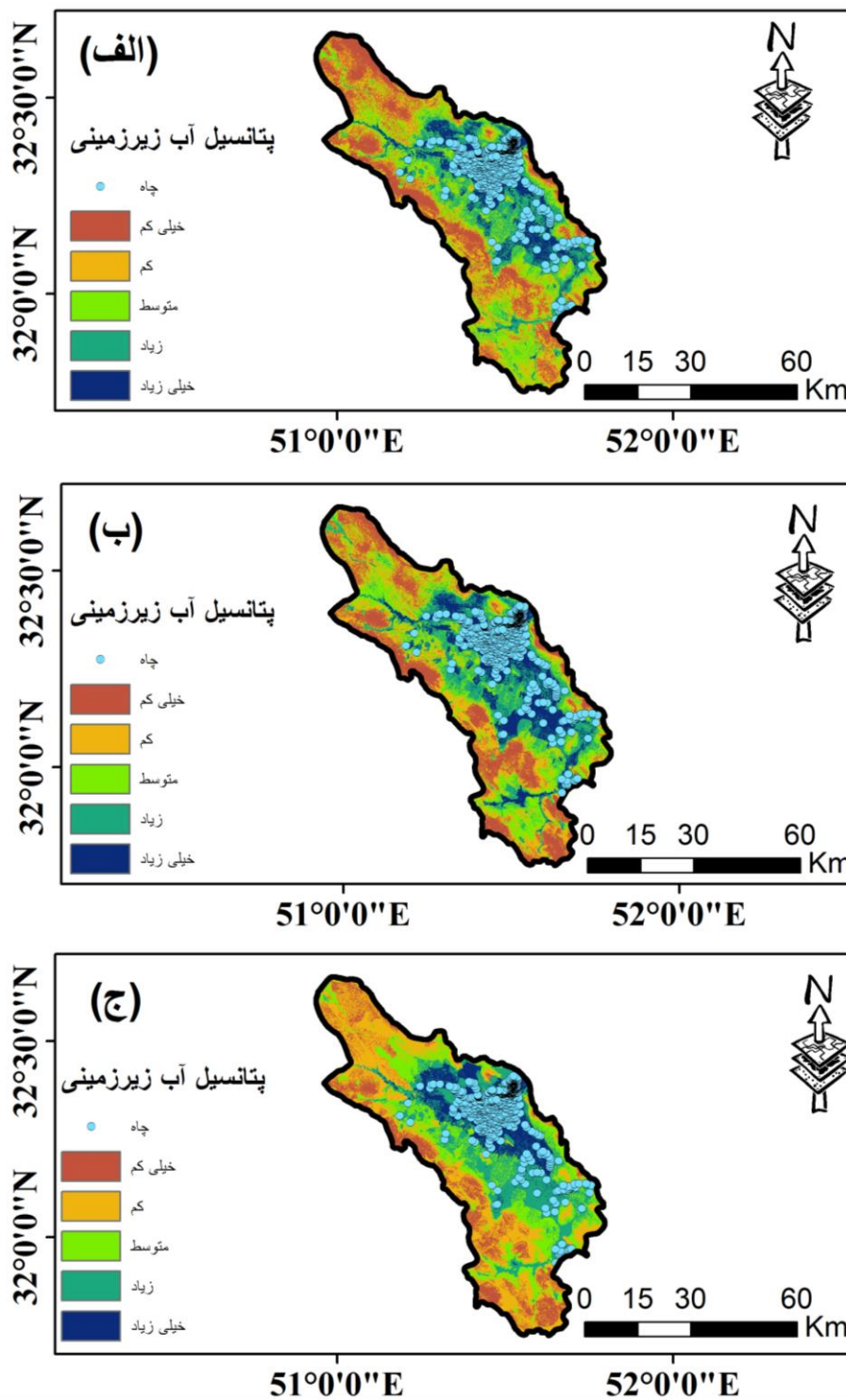
شکل ۲- نقشه ارتفاع (الف)، جهت شیب (ب)، شیب (پ)، انحنای سطح (ت)، فاصله از زهکشی (ث) و تراکم زهکشی (ج)



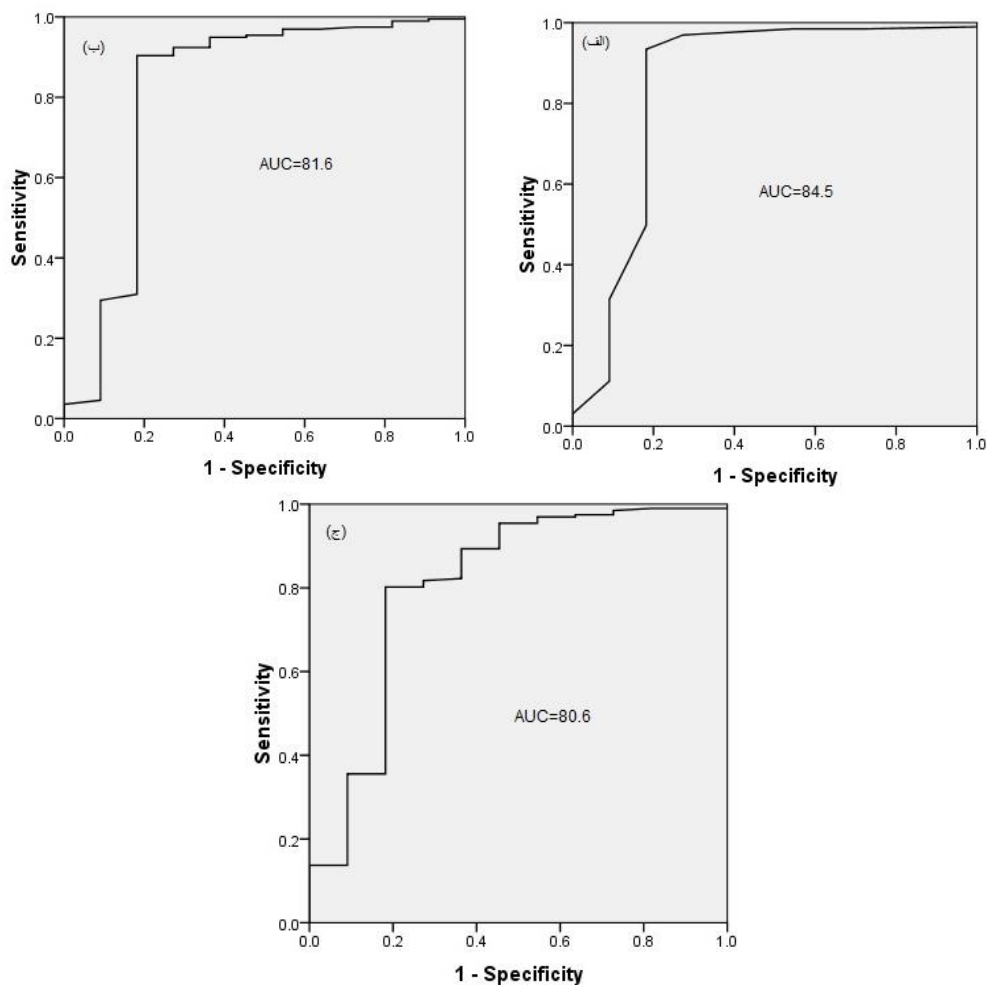
شکل ۳- نقشه فاصله از گسل (چ)، تراکم گسل (ج)، شاخص رطوبت توپوگرافی (خ)، خاکشناسی (د)، کاربری اراضی (ذ) و سنگشناسی



شکل ۴- پتانسیل آب زیرزمینی با مدل شاخص آماری (الف)، وزن شواهد (ب) و آنتروپی شانون (ج)



شکل ۵- نقشه هم‌پوشانی چاه‌ها با نقشه‌های حاصل از مدل شاخص آماری (الف)، وزن شواهد (ب) و آنتروپی شانون (ج)



شکل ۶- نمودار ROC در مرحله اعتبارسنجی مدل شاخص آماری (الف)، وزن شواهد (ب) و آنتروپی شانون (ج)

زیرزمینی شامل: لایه ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، تراکم گسل، سنگ‌شناسی، خاک، کاربری اراضی و شاخص رطوبت توپوگرافی هستند و نتایج پیش‌بینی حاکی از این بود که این عوامل در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی مناسب هستند. نتایج مدل‌ها نشان داد که مناطقی با ارتفاع و شیب کم، پتانسیل بالاتری دارند که به علت بالا بودن سطح نفوذ و حرکت آب در خاک، پتانسیل آب زیرزمینی در این مناطق بیشتر است که با نتایج شفیعی و همکاران (۱۳۹۸) نیز مطابقت دارد. علاوه بر آن، منطقه در جهت شیب شرقی و مسطح نسبت به سایر جهات دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالاتری است که با نتایج فلاح و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد.

از دیدگاه کاربری اراضی، اراضی زراعی دارای پتانسیل بالای آب زیرزمینی بوده که با نتایج یونسی و همکاران (۱۳۹۹) نیز مطابقت دارد. نتایج نشان‌دهنده آن است که هر چه میزان فاصله از آبراهه کمتر و تراکم زهکشی بیشتر باشد، پتانسیل آب زیرزمینی منطقه

در این پژوهش، پتانسیل آب زیرزمینی با بررسی ۶۲۴ مورد از چاه‌های موجود و با استفاده از مدل‌های شاخص آماری، وزن شواهد و آنتروپی شانون، مورد بررسی قرار گرفت. ۷۰ درصد چاه‌ها (۴۱۶ چاه) برای کالیبره و ۳۰ درصد باقی‌مانده (۲۰۸ چاه) برای اعتبارسنجی استفاده شد که صحت مدل شاخص آماری با میزان ۸۴/۵ درصد، مدل وزن شواهد با میزان ۸۱/۶ درصد و مدل آنتروپی شانون با میزان ۸۰/۶ درصد، بیانگر دقت خوب و قابل قبول این مدل‌ها در تعیین مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده لنجانات اصفهان می‌باشد. یافته‌های پژوهش حاضر نشان‌دهنده میزان دقت بالاتر مدل شاخص آماری در پتانسیل‌یابی مناطق آب زیرزمینی نسبت به دو مدل دیگر است. در مطالعه یونسی و همکاران (۱۳۹۹) نیز دقت مدل شاخص آماری بالاتر بود و در نتیجه برای تهیه نقشه پتانسیل، مناسب‌تر معرفی شد.

در مطالعه حاضر، بیش از ۶۰ درصد منطقه دارای پتانسیل آب زیرزمینی متوسط تا خیلی زیاد است. ۱۲ لایه مؤثر در پتانسیل آب

نوحانی، ا.، معروفی نیا، ا. و خسروی، خ. ۱۳۹۷. ارزیابی روش نسبت فراوانی در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی دشت الشتر، استان لرستان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲ (۱): ۱۲۹-۱۱۹.

یوسفی، ح.، یونسی، ح.، ارشیا، ا.، یاراحمدی، ی. و گودرزی، ا. ۱۴۰۰. تعیین مناطق مستعد سیل با مدل‌های SI، FR و Shannon به منظور کاهش مخاطرات سیل (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کشکان). نشریه اکو هیدرولوژی. ۸ (۱): ۳۱۹-۳۰۷.

یونسی، ح.، ترابی پوده، ح.، شاهی نژاد، ب. و ارشیا، آ. ۱۳۹۹. پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های وزن شواهد و شاخص آماری در محدوده نجف‌آباد. نشریه ترویج و توسعه آبخیزداری. ۸ (۲۹): ۴۳-۳۶.

Bednarik, M., Magulova, B., Matys, M. and Marschalko, M. 2010. Landslide Susceptibility Assessment of the Kral ovany-Liptovsky Mikulas Railway Case Study. Physics and Chemistry of the Earth. 35(3-5): 162-171.

Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F. 1988. Integration of Geological Datasets for Gold Exploration in Nova Scotia. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 0099-112.88/5411 - 1585\$ 02.25/0.

Bui, D., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O. 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. Natural Hazards. 59(3): 1413-44.

Chen, W., Li, H., Hou, E., Wang, S. and Wang, G. 2018. Panahi M, et al. GIS-based groundwater potential analysis using novel ensemble weights-of-evidence with logistic regression and functional tree models. Science of the Total Environment. (634): 853-867.

Chenini, I., Mammou, A. B, and El May, M. 2010. Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in Central Tunisia (Maknassy Basin). Water Resources Management. 24(5):921-39.

Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S. and Paudyal, P. 2008. Predictive modeling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. Geomorphology 102:496-510.

Fritch, T. G., McKnight, C. L., Yelderman Jr., J. C., Dworkin, S. I. and Arnold, J. G. 2002. A predictive modeling approach to assessing the groundwater pollution susceptibility of the Paluxy Aquifer, Central Texas, using a Geographic Information System, Environmental Geology. (39): 1063-1069.

Golkarian, A. and Rahmati, O. 2018. Use of a maximum entropy model to identify the key factors that

بالاتر است. از لحاظ خاک، مناطق با خاک آریدی سول در مقایسه با دو رده خاک دیگر یعنی انتی سول و اینسپتی سول دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالاتری هستند که با مطالعات پژوهشگران دیگر از جمله فلاح و همکاران (۱۳۹۶) و یونسی و همکاران (۱۳۹۹) نیز مطابقت دارد. رسوبات آبرفتی نرم دارای پتانسیل بالاتری نسبت به سایر رسوبات هستند. مطابق شرایط مذکور انتظار می‌رود که مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی به واسطه‌ی تمرکز بالای عوامل مؤثر در ایجاد شرایط مستعد آب زیرزمینی بیشتر در بخش شرقی منطقه قرار گیرد. نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمده از روش‌های شاخص آماری، وزن شواهد و آنتروپی شانون نیز این مناطق را به عنوان مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی بالا نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از حساسیت سنجی نشان داد که مدل‌ها به دو متغیر کاربری اراضی و شیب حساس تر هستند. تعیین مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی از لحاظ شناسایی مناطق برای اجرای برنامه‌های مدیریتی مهم است. در نهایت به کارگیری مدل‌های شاخص آماری، وزن شواهد و آنتروپی شانون و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای بررسی پتانسیل آب زیرزمینی به ویژه در کشورهای در حال توسعه که معمولاً در دستیابی به اطلاعات با محدودیت‌های زیادی مواجه هستند پیشنهاد می‌گردد.

منابع

شفیعی، ن.، امیراحمدی، ا. و رحمانی، ا. ۱۳۹۸. پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با مدل آنتروپی شانون حوزه آبریز دشت نورآباد ممسنی. نشریه فضای جغرافیایی. ۱۹ (۶۶): ۳۰۴-۲۹۱.

عرب عامری، ع.، رضایی، خ.، یمانی، م. و شیرانی، ک. ۱۳۹۷. مدل سازی و تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش ترکیبی داده محور تابع شواهد قطعی- شاخص آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه نجف‌آباد). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۵ (۲): ۴۸-۲۵.

فرامرزی، ح.، حسینی، س. م.، پور قاسمی، ح. و فرنقی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی و پهنه‌بندی وقوع مخاطره سیلاب در پارک ملی گلستان. نشریه اکو هیدرولوژی. ۶ (۴): ۱۰۶۸-۱۰۵۵.

فلاح، ف.، دانشفر، م. و قربانی، س. ۱۳۹۶. پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی خرم‌آباد با استفاده از روش شاخص آماری. نشریه آب و توسعه پایدار. ۴ (۱): ۹۸-۸۹.

مفیدی فر، م.، اصلاح، م. و حسن آبادی، ع. ۱۳۹۴. مقایسه مدل‌های تصمیم‌گیری تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی حوزه دشت یزد - اردکان در محیط GIS. نشریه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی. ۱ (۵۷): ۱۵۶-۱۴۷.

- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R. and Melesse, A. M. 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.
- Regmi, A.D., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H.R., Khumamoto, T. and Akgun, A. 2013. Application of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models, and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*. 7(2): 725-742.. Doi: 10.1007/s12517-012-0807-z.
- Sener, B., Suzen, M. L. and Doyuran, V. 2006. Landfill site selection by using geographic information systems. *Environmental Geology*. 49 (3):376-388.
- 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, *Applied Water Science*. 7(7): 4117-4131.
- Xu, C., Xu, X., Dai, F., Xiao, J., Tan, X. and Yuan, R. 2012. Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui River watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science*. 23(1): 97-120.
- influence groundwater availability on the Gonabad Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*. (77): 369.
- Haghizade, A., Moghaddam, D. and Pourghasemi, H. 2017. GIS-based bivariate statistical techniques for groundwater potential analysis. *Journal of Earth System Science*. 126(8): 1-17.
- Jothibasau, A., Anbazhagan, S. 2016. Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River basin of South India using analytic hierarchy process. *Modeling Earth Systems and Environment* .2(3): 1-14.
- Lee, S., Hyun, Y. and Lee, M. 2019. Groundwater Potential Mapping Using Data Mining Models of Big Data Analysis in Goyang-si, South Korea. *Sustainability*. 11(6): 1678.
- Mogaji, K. A. and Lim, H. S. 2018. Application of Dempster-Shafer theory of evidence model to geoelectric and hydraulic parameters for groundwater potential zonation. *Journal of Astronomy and Geophysics*. 7(1): 134-148.
- Oh, H-J., Kim, Y-S., Choi, J-K., Park, E. and 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.

Determination of Groundwater Susceptibility Areas Using SI, WOE and Shannon Models (Case Study: Isfahan Lenjanat)

H. Torabi Podeh^{1*}, B. Shahininejad², Y. Yarahmadi³, A. Arshia⁴

Received: Apr. 21, 2021

Accepted: Jun. 15, 2021

Abstract

Identification of groundwater potential areas is one of the most important and necessary issues in the management of water resources of any country, especially developing countries. In this study, the groundwater zoning map was presented using WOE, SI and Shannon models in ArcGIS10.5. For this purpose, the geographical location of 624 wells with a flow rate of more than 10 cubic meters per second in the region were divided into two groups: calibration (70%) and validation (30%). In implementing all three models of effective parameters in groundwater potential identification including: height, slope, slope direction, land curvature, geology, land use, soil science, topographic moisture index, distance from fault, fault density, waterway density and Distance from the canal was used. The ROC curve in SPSS software was used to validate the results of the models. The highest accuracy for this region was assigned to the statistical index model, the AUC value for this model is 84.5%, followed by evidence weight models with 81.6% and Shannon entropy with 80.6%, respectively. More than 60% of the area has moderate to very high groundwater potential. The statistical index model is more appropriate and accurate for this region. Determining areas with high groundwater potential using the above methods is appropriate for implementing management programs.

Keyword: Evidence weight, Groundwater, Lenjanat, Shannon entropy, Statistical index

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran

3- Ph. D student, Department of Watershed Science and Engineering, Kashan University, Kashan, Iran

4- Ph. D student, Department of water structures, Lorestan University, Lorestan, Iran

(* - Corresponding Author Email: torabi.ha@lu.ac.ir)