

ارزیابی و تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی وزن شاهد و رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: شهرستان نهاوند)

سید وحید رضوی ترمه^۱، کورش شیرانی^{۲*} و مسعود سلطانی ربیع^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۹)

چکیده

امروزه تأمین آب به منظور تحقق اهداف توسعه پایدار یکی از مهم ترین دغدغه‌ها و چالش‌ها در بیشتر کشورهای جهان است. به همین دلیل تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، از ابزارهای مهم در حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب به‌شمار می‌رود. هدف این پژوهش تهیه و ارزیابی نقشه پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی در شهرستان نهاوند، در استان همدان با استفاده از مدل وزن شاهد و ترکیب آن با رگرسیون لجستیک است. بدین منظور عوامل زاویه شیب، وجه شیب، طول شیب، ارتفاع، انحنا سطح، انحنا آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی به‌عنوان عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی شناسایی و در نرم‌افزار ArcGIS رقومی و تهیه شدند. پس از تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی با این دو مدل، از سطح زیر منحنی (AUC) منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) برای ارزیابی نتایج استفاده شد. از ۲۷۳ چشمه معرفی شده در این پژوهش، ۱۹۱ چشمه (۷۰ درصد) برای اجرای مدل‌ها (تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی) و ۸۲ چشمه (۳۰ درصد) برای ارزیابی مدل استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد مدل تلفیقی وزن شاهد- رگرسیون لجستیک (AUC=۸۲/۵ درصد) نسبت به مدل وزن شاهد (AUC=۸۰/۴ درصد) کارایی بهتری در شناسایی مناطق مستعد آب زیرزمینی دارد لذا مدیران و برنامه‌ریزان اجرایی به‌منظور پی‌جویی محل‌های مناسب با پتانسیل بالای آب زیرزمینی در مطالعات نیمه‌تفصیلی خود از نتایج این پژوهش به‌منظور کاهش زمان و افزایش دقت می‌توانند استفاده کنند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی مکانی، چشمه، مدل‌های آماری، شهرستان نهاوند

۱. گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. بخش حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

۳. گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی و سنجش از دور، دانشکده فنی و مهندسی، مؤسسه آموزش عالی عمران و توسعه همدان، همدان

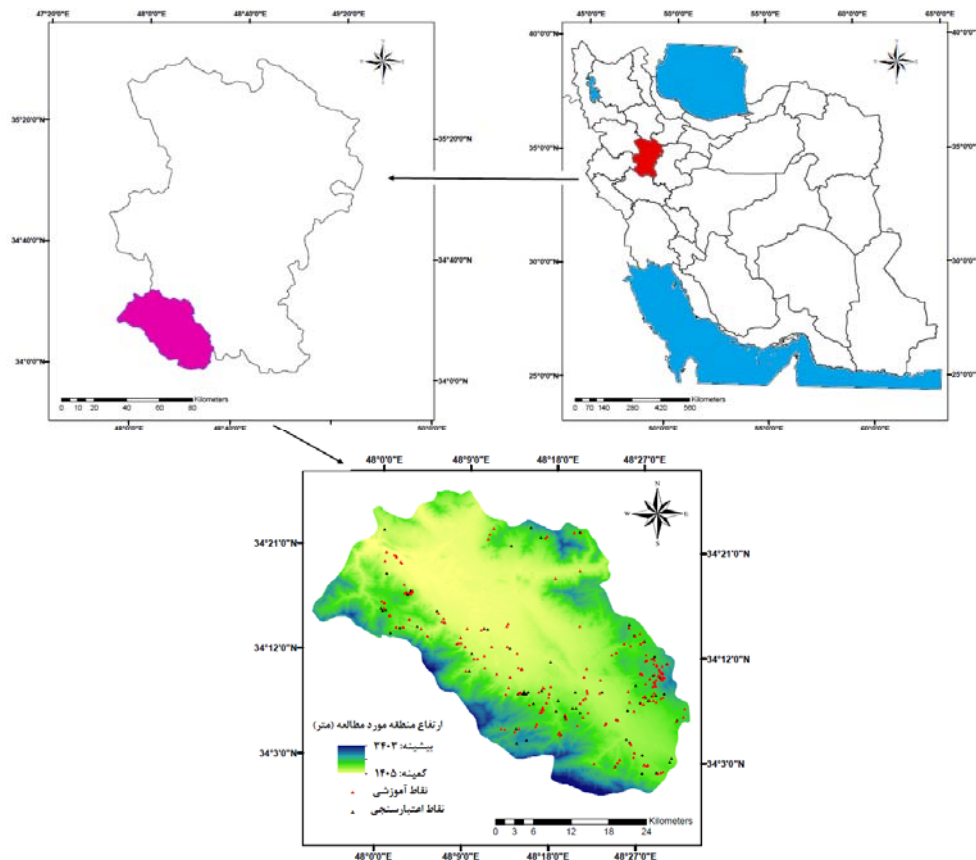
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: K.Shirani@areeo.ac.ir

مقدمه

آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از ارزشمندترین منابع طبیعی در نظر گرفته می‌شود (۳۱) که به‌علت خصوصیات از قبیل دمای ثابت، دسترسی گسترده، کمترین آسیب‌پذیری ناشی از آلودگی، کم‌هزینه بودن توسعه آن و قابل اعتماد بودن در زمان خشکسالی، دارای ارزش بالایی است (۱۳). رشد سریع جمعیت انسانی، تقاضا برای آب زیرزمینی به‌منظور نوشیدن، کشاورزی و مصارف صنعتی را افزایش داده است (۱۵). به‌علت افزایش تقاضا برای آب زیرزمینی، توصیف مناطق بالقوه آب زیرزمینی امر ضروری برای تعیین، محافظت و مدیریت آب زیرزمینی است (۲۳). از دیگر مزیت آب زیرزمینی، تأثیر کم رویدادهای ناگوار بر آن است و می‌تواند در زمان نیاز بهره‌برداری شود (۱۸). وقوع خشکسالی‌های متناوب و طولانی و نوسان زیاد آب‌وهوا از عوامل اصلی کمبود آب به‌ویژه منابع آب سطحی است که فشار مضاعفی را بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کند، از این‌رو استخراج آب زیرزمینی به‌عنوان یک نیاز در حال افزایش است (۳۷ و ۱۸). با این‌وجود، نیاز به استفاده از روش‌هایی برای پیش‌بینی مناطق بالقوه آب زیرزمینی در مقیاس ملی، منطقه‌ای و محلی است (۳۷ و ۲۴).

روش‌های سنتی استخراج آب زیرزمینی مانند روش‌های هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و ژئوفیزیک به‌دلیل هزینه بالا و صرف مدت زمان زیاد حفاری، مقرون به‌صرفه نبود (۳، ۴ و ۵). بنابراین از روش‌هایی در ترکیب با سیستم اطلاعات جغرافیایی، با در نظر گرفتن هزینه و زمان مؤثر به‌منظور پیش‌بینی مکانی آب زیرزمینی استفاده شده است (۱ و ۱۷). تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی ابزاری محبوب به‌منظور به‌کارگیری حجم زیادی از داده‌های مکانی است که در محیط زیست و مدیریت منابع آب به‌کار گرفته شده است (۶). تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و روش‌های زمین‌آمار، به‌عنوان روشی سودمند برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در جهان شناخته شده است (۱۱). روش‌های متعددی در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده شده است که می‌توان به‌مدل‌های نسبت فراوانی (Ratio Frequency)، رگرسیون لجستیک (Logistic Regression)،

مدل وزن شاهد (Weights-of-Evidence) و آنتروپی (Shannon's Entropy) اشاره کرد (۷، ۸، ۹، ۲۰ و ۲۲). همچنین از تکنیک‌های محاسبات نرم مانند درخت تصمیم (Decision Tree) (۵ و ۱۴)، شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) (۲۰) و منطق فازی (۳۶) به‌منظور تهیه نقشه مناطق بالقوه آب زیرزمینی استفاده شده است. در این راستا پورتقی و پورقاسمی (۲۵) به ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از نقاط چشمه در شهرستان بیرجند پرداختند. بدین منظور ایشان از روش‌های نسبت فراوانی، وزن شاهد و رگرسیون لجستیک در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند و نشان دادند که روش نسبت فراوانی با مقدار سطح زیر منحنی (AUC) برابر ۷۹/۶۹ درصد بهترین عملکرد را داشته است. در پژوهش دیگری تقی‌بی و همکاران (۲۶) به ارزیابی مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که مدل آنتروپی دارای دقت ۹۱ درصد و مدل نسبت فراوانی دارای دقت ۸۸ درصد است. رحمتی و همکاران (۳۰) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در استان کردستان پرداختند و به‌دقت ۷۳/۶۶ درصد دست یافتند. رضوی و همکاران (۲۹) با استفاده از روش‌های آماری نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی به تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی پرداختند و نتایج آنها نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل آنتروپی نسبت به دو مدل دیگر بوده است. به‌نظر می‌رسد استفاده تلفیقی مدل‌های مناسب در افزایش کارآمدی نقشه پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی نقش مؤثری داشته باشد. بنابراین نوآوری پژوهش حاضر ترکیب روش آماری دو متغیره وزن شاهد و روش آماری چند متغیره رگرسیون لجستیک در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی است. با توجه به مطالب اشاره شده هدف از انجام پژوهش حاضر، شناسایی و تعیین بهترین مناطق آبی برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی در شهرستان نهاوند با استفاده از تلفیق مدل وزن شاهد با مدل رگرسیون لجستیک در سیستم اطلاعات جغرافیایی است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت چشمه‌ها

بیشترین کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه کشاورزی و مرتع است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی، ۳۶ درصد از واحد سنگ‌شناسی منطقه ۲ Qft است. از مهم‌ترین چشمه‌های شهرستان نهاوند، سراب گاماسیاب با آبدهی ۱۵۰۰ لیتر بر ثانیه، سراب کنگاور با آبدهی ۲۱۰ لیتر بر ثانیه، سراب ملوسان با آبدهی ۱۳۵ لیتر بر ثانیه و سراب بنفشه با آبدهی ۵۰ لیتر بر ثانیه است. بیشترین مصرف چشمه‌ها در این منطقه در زمینه کشاورزی است و اکثر سازندهای آن از نوع آهکی و آبرفتی است. منطقه مورد مطالعه به‌همراه موقعیت چشمه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

نقشه پراکنش چشمه

به‌منظور شناسایی چشمه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه،

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان نهاوند در جنوب غربی استان همدان، ایران با مساحت ۱۵۳۵ کیلومترمربع واقع شده است. منطقه مورد مطالعه بین عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی استقرار یافته است. بیشینه و کمینه ارتفاع در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب ۱۴۰۵ متر و ۳۴۰۳ متر و ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۶۶۷ متر است. میانگین سالانه دما در منطقه مورد مطالعه حدود ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد است. سردترین ماه سال در شهرستان نهاوند، دی‌ماه با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد و گرم‌ترین ماه، تیرماه با ۲۵/۶+ درجه سانتی‌گراد و همچنین میانگین بارش سالانه ۳۷۶ میلی‌متر است.

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right) \quad (2)$$

که در آن: A_s و β به ترتیب نشان‌دهنده مساحت یک حوضه مشخص (m^2) و زاویه شیب (برحسب درجه) است.

شاخص توان آبراهه بیانگر توان فرساینده‌گی جریان است که با درجه شیب و مساحت حوضه آبخیز رابطه مستقیم دارد. شاخص توان آبراهه مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (۱۹).

$$SPI = A_s * \tan \beta \quad (3)$$

که در آن: A_s و β به ترتیب نشان‌دهنده مساحت یک حوضه مشخص (m^2) و زاویه شیب (برحسب درجه) است.

نوع سنگ‌شناسی و خصوصیات وابسته به آن نظیر بافت و درجه خلوص سنگ نقش مهمی در تخلخل، نفوذپذیری اولیه و تمرکز جریان آب زیرزمینی در داخل سنگ‌ها ایفا می‌کند (۱۴). نقشه زمین‌شناسی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ایران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ به دست آمد و لایه‌های گسل و سنگ‌شناسی از آن استخراج شد. لایه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. بیشترین کاربری منطقه مورد مطالعه، مرتع و کشاورزی است. معیارهای تأثیرگذار بر آب زیرزمینی در این پژوهش، در شکل (۲) نشان داده شده است.

مدل وزن شاهد (Weight of Evidence)

تئوری وزن شاهد روشی داده محور است که به‌عنوان یکی از مدل‌های نظریه بیزین در قالب لگاریتم خطی شناخته شده است (۳۲) و از احتمال قبلی (غیرشرطی) و خلفی (شرطی) بهره می‌گیرد (۳۲). این روش زمانی که داده‌های کافی به‌منظور برآورد اهمیت نسبی میانگین‌های آماری مدنظر باشد، استفاده می‌شود (۱۶). احتمال قبلی یا اولیه در واقع احتمال یک شاهد یا رخداد (وقوع چشمه) است که توسط انواع وقایع مشابه که در گذشته در یک دوره زمانی معین رخ می‌دهند مشخص و تعیین می‌شود. در مدل وزن شاهد، وزن هر کلاس از معیارهای تأثیرگذار بر اساس رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود (۳).

$$W^+ = \ln \frac{P\{B|A\}}{P\{B|\bar{A}\}} \quad (4)$$

علاوه بر اجرای مطالعات گسترده صحرایی، اطلاعات موقعیت جغرافیایی چشمه‌ها در شهرستان نهاوند از سازمان پژوهش‌های منابع آب ایران گرفته شد. در مجموع ۲۷۳ چشمه در شهرستان نهاوند، استان همدان ایران شناسایی شد (شکل ۱). با استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی تصادفی (۲۰) از ۲۷۳ چشمه، ۱۹۱ چشمه (۷۰ درصد) برای داده‌های آموزشی و ۸۲ چشمه باقی‌مانده (۳۰ درصد) به‌عنوان داده ارزیابی مدل‌ها در نظر گرفته شد.

معیارهای تأثیرگذار بر آب زیرزمینی

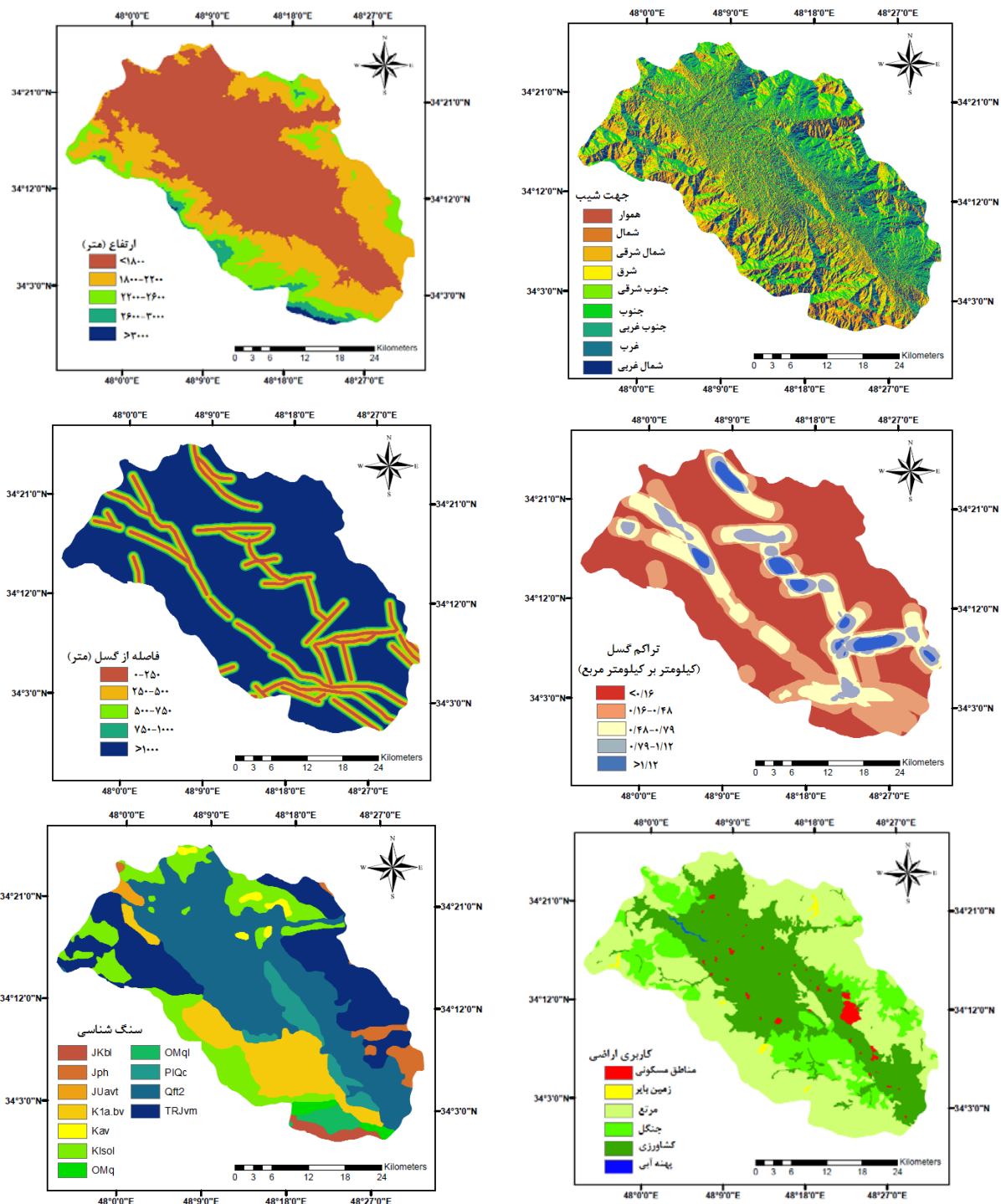
بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته در داخل و خارج از کشور (۳۷، ۱۷، ۲۳، ۲۵ و ۲۶)، لایه‌های اطلاعاتی مختلف مانند ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، طول شیب، شاخص توان آبراهه (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، تراکم آبراهه، تراکم گسل، انحنای سطح و انحنای آبراهه انتخاب و در محیط GIS آماده شد.

در ابتدا مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از ماهواره ASTER تهیه شد و لایه‌های تأثیرگذار بر آب زیرزمینی مانند ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طول شیب، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنای سطح و انحنای آبراهه از مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.3 و SAGA-GIS تهیه شد. طول شیب که ترکیبی از طول شیب (L) و سرازیری شیب (S) است، مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (۱۹).

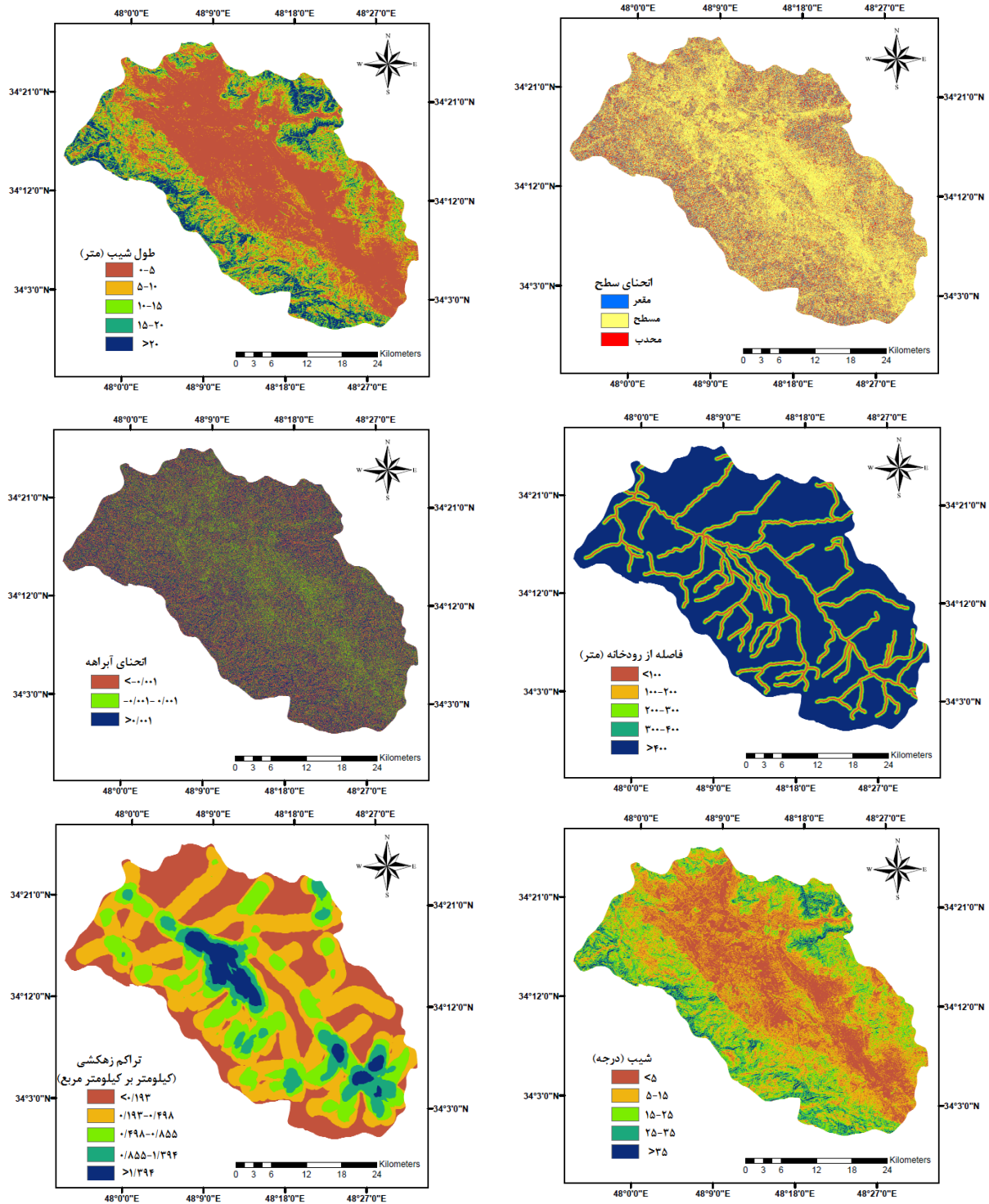
$$LS = \left(\frac{B_s}{22/13}\right)^{5/6} \left(\frac{\sin \alpha}{0/0.896}\right)^{1/3} \quad (1)$$

که در آن: α گرادیان شیب برحسب درجه و B_s مساحت حوضه آبخیز (m^2) است.

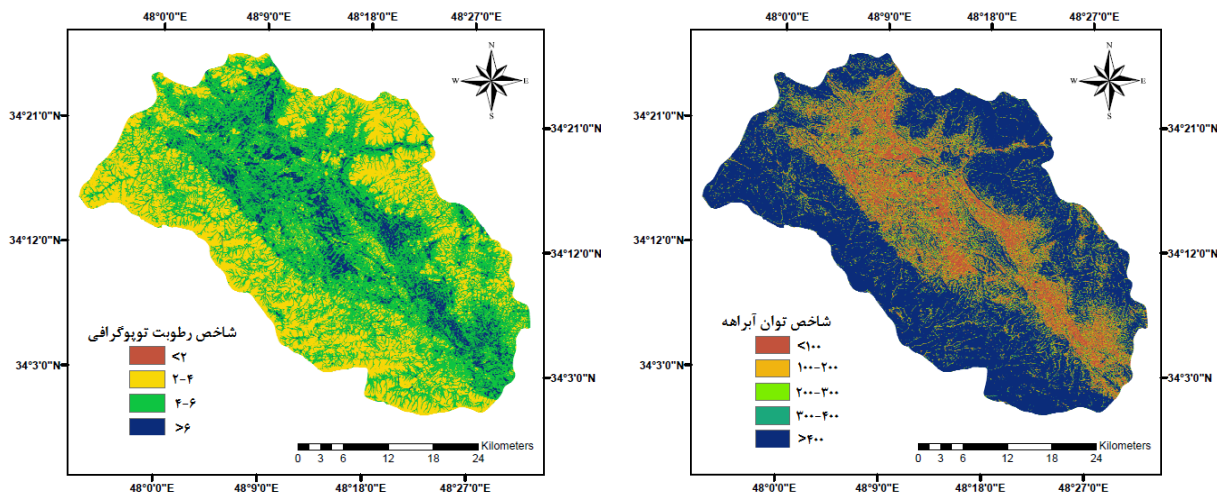
شاخص رطوبت توپوگرافی نشان‌دهنده مقدار جریان جمعی مربوط به یک نقطه از حوضه آبخیز است که تحت تأثیر نیروی گرانش تمایل به رفتن آب در نواحی با شیب کمتر دارد (۲۸). شاخص رطوبت توپوگرافی به‌طور مستقیم از مدل ارتفاعی رقومی مطابق رابطه (۲) محاسبه شد (۳۳ و ۱۲).



شکل ۲. لایه‌های اطلاعاتی تأثیرگذار بر آب زیرزمینی



ادامه شکل ۲.



ادامه شکل ۲.

$$S^+W^- = \frac{1}{\{B \cap A\}} + \frac{1}{\overline{B \cap A}} \quad (9)$$

که در آن: N تعداد کل پیکسل‌هاست و سرانجام وزن نهایی از نسبت مقدار C به انحراف معیار مطابق رابطه ۱۰ به دست می‌آید

$$W_{\text{final}} = \left(\frac{C}{S(C)} \right) \quad (10)$$

مدل رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک یک روش آماری چند متغیره است که ارتباط مکانی بین متغیرهای مستقل و وابسته برقرار می‌کند (۴). متغیر وابسته می‌تواند به صورت دویخی باشد درحالی که متغیر مستقل می‌تواند به صورت فاصله‌ای، دویخی و طبقه‌بندی شده باشد (۴). متغیر وابسته دارای دو مقدار وقوع و عدم وقوع چشمه است. هدف از مدل رگرسیون لجستیک تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی، پیدا کردن بهترین مدل برازش به منظور توصیف رابطه مکانی بین وقوع و عدم وقوع چشمه با مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل است (۳۶). رابطه بین احتمال وقوع چشمه و متغیرهای مستقل به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود (۴ و ۳۶).

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (11)$$

که در آن p احتمال وقوع چشمه که به صورت متغیر بین صفر

$$W^- = \ln \frac{P\{\overline{B} | A\}}{P\{\overline{B} | \overline{A}\}} \quad (5)$$

$$C = W^+ - W^- \quad (6)$$

که در آن: W^+ وزن شاهد عامل در وقوع چشمه در صورت حضور رده عامل مؤثر (شرطی)، W^- وزن شاهد عامل در وقوع چشمه در صورت عدم حضور رده عامل مؤثر (شرطی)، B وجود (سطح) رده عامل مؤثر (شرطی) در وقوع چشمه بالقوه، A وجود (سطح) چشمه، \overline{B} عدم وجود (سطح) رده عامل مؤثر (شرطی) در وقوع چشمه بالقوه، \overline{A} عدم وجود (سطح) چشمه هستند. پارامتر C نیز اختلاف بین وزن مثبت و منفی بوده و بزرگی ارتباط مکانی عامل علت و معلول را نشان می‌دهد (۲۵). برای به دست آوردن وزن نهایی (W)، انحراف معیار به صورت رابطه (۷) ارائه می‌شود.

$$S(C) = \sqrt{S^+W^+ + S^+W^-} \quad (7)$$

همان‌طور که در معادله (۷) نشان داده شده، S^+W^+ واریانس وزن‌های مثبت و S^+W^- واریانس وزن‌های منفی است. واریانس وزن‌ها به صورت رابطه‌های (۸ و ۹) نشان داده شده است (۲۵).

$$S^+W^+ = \frac{1}{N\{B \cap A\}} + \frac{1}{\overline{B \cap A}} \quad (8)$$

نتایج و بحث

نتایج حاصل از روش وزن شاهد

نتایج حاصل از رابطه مکانی بین وقوع چشمه و معیارهای مؤثر با استفاده از روش وزن شاهد در جدول (۱) نشان داده شده است. آنالیزهایی از نسبت فراوانی بین وقوع چشمه و زاویه شیب نشان می‌دهد که بالاترین مقدار مربوط به طبقه شیب بین ۱۵-۵ درجه (۶/۸۶۴) است و بقیه طبقه‌ها دارای تأثیری منفی بر آب زیرزمینی است. بر طبق رابطه‌ای که بین مقدار نسبت فراوانی و جهت شیب وجود دارد، بیشترین مقدار نسبت فراوانی در جنوب غرب قرار دارد (۱/۴۷) که این امر نشان‌دهنده پتانسیل بالای آب زیرزمینی در جهت مذکور است. در شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) طبقه ۶-۴ دارای بالاترین مقدار (۷/۵۶۲) و در شاخص توان آبراهه (SPI) طبقه بیشتر از ۴۰۰ متر دارای بیشترین مقدار نسبت فراوانی (۵/۰۸۱) است. در رابطه با طول شیب بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به طبقه ۱۰-۵ با مقدار نسبت فراوانی (۵/۵۸۵) است و بقیه طبقه‌ها دارای تأثیر منفی بر آب زیرزمینی است. برای معیار یا فاصله از رودخانه، بیشترین مقدار مربوط به طبقه‌های ۱۰۰-۰ و ۲۰۰-۱۰۰ متر به ترتیب با مقادیر ۵/۷۴ و ۱/۰۶۲ است و بقیه طبقات دارای تأثیر منفی است. در رابطه با فاصله از گسل به ترتیب بیشترین وقوع چشمه مربوط به طبقه ۲۵۰-۵۰۰ متر با مقدار نسبت فراوانی ۴/۱۵ است. بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به تراکم زهکشی و تراکم گسل مربوط به طبقات ۰/۸۵۵-۰/۴۹۸ و ۰/۷۹-۰/۴۸ است. در عامل سنگ‌شناسی، گروه چهار (Jph) با مقدار ۶/۴۶ دارای بیشترین تأثیر بر پتانسیل آب زیرزمینی است. در عامل انحنای سطح نیز بیشترین وزن مربوط به طبقه مقعر با مقدار ۱/۷۲۱ و پس از آن طبقه هموار با مقدار ۱/۶۳۳ است و طبقه محدب دارای مقدار منفی است. در معیار انحنای آبراهه، بیشترین مقدار مربوط به طبقه ۰/۰۰۱-۰/۰۰۱ با مقدار ۱/۸۴۴ است. نتایج معیار کاربری اراضی نشان داد بیشترین وزن، مربوط به کاربری جنگل، کاربری شهری و کاربری کشاورزی به ترتیب

تا یک است. و Z جمع خطی یک مقدار ثابت است که متغیرهای مستقل و ضرایب مربوط به آنها را محاسبه می‌کند. پارامتر Z در بازه مثبت بی‌نهایت تا منفی بی‌نهایت قرار دارد و مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (۴ و ۳۶).

$$Z = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n \quad (12)$$

که در آن α مقدار ثابت، $\beta_1 \dots \beta_n$ ضرایب و $x_1 \dots x_n$ متغیرهای مستقل است.

ارزیابی و مقایسه مدل‌ها

منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) روش مفیدی برای نمایش کیفیت شناسایی قطعی و احتمالی و نیز پیش‌بینی سیستم‌هاست (۲۱ و ۳۵). مساحت زیر منحنی، کیفیت پیش‌بینی سیستم را به وسیله توصیف توانایی سیستم برای پیش‌بینی دقیق اتفاق افتادن یا نیفتادن وقایع از پیش تعیین‌شده توصیف می‌کند (۲۱). شاخص عملکرد نسبی، منحنی است که مؤلفه قائم و افقی آن به ترتیب از رابطه‌های (۷ و ۸) محاسبه می‌شوند و از ماتریس مقایسه با تعریف حد آستانه بین صفر و یک به دست می‌آیند. مقادیر مربوط به درصد واقعیت صحیح (True Positive) درصد واقعیت کذب (False Positive) نمودار بر طبق روابط زیر محاسبه می‌شود (۱۰ و ۳۵).

$$X = 1 - \left[\frac{TN}{TN + FP} \right] \quad (13)$$

$$Y = \left[\frac{TP}{TP + FN} \right] \quad (14)$$

ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵-۱ متغیر است. چنانچه مدلی نتواند رخداد وقوع چشمه را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین بزند، مقدار AUC آن ۰/۵ است و زمانی که منحنی ROC، سطح زیر منحنی برابر یک داشته باشد بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است. همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت ۰/۹-۱ عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵-۰/۶ ضعیف است (۱۰ و ۳۵).

جدول ۱. رابطه مکانی بین هر معیار مؤثر و محل چشمه‌ها با استفاده از مدل وزن شاهد

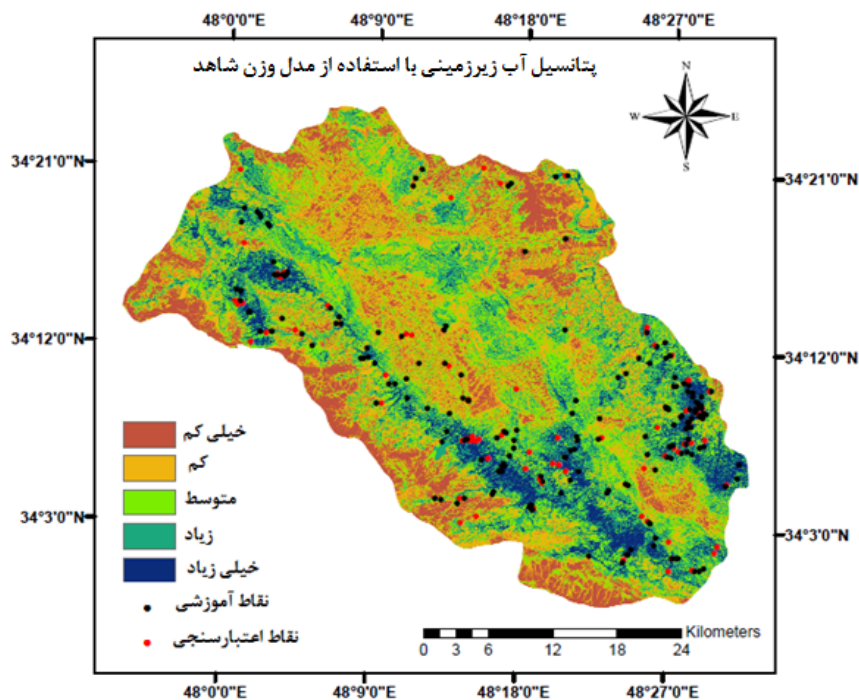
معیار	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد چشمه	W^+	W^-	C	S^+W^+	S^-W^-	S(C)	W_{final}
ارتفاع	کمتر از ۱۸۰۰	۱۰۳۵۹۱	۸۳	-۰/۲۱۳	۰/۲۰۲	-۰/۴۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹۲	۰/۱۴۵	-۲/۸۴۶
	۱۸۰۰-۲۲۰۰	۶۰۶۳۶۳	۱۰۰	۰/۵۰۸	-۰/۳۶۳	۰/۸۷۱	۰/۰۱	۰/۰۱۰۹	۰/۱۴۴	۶/۰۱۶
	۲۲۰۰-۲۶۰۰	۲۲۶۰۸۴	۸	-۱/۰۳	۰/۰۸۲	-۱/۱۲	۰/۱۲۵	۰/۰۰۵۴	۰/۳۶۱	-۳/۰۸۱
	۲۶۰۰-۳۰۰۰	۴۷۷۵۱	۰	-	۰/۰۲۵	-	-	۰/۰۰۵۲	-	-
	بیشتر از ۳۰۰۰	۹۴۲۲	۰	-	۰/۰۰۴۹	-	-	۰/۰۰۵۲	-	-
زاویه شیب	کمتر از ۵	۵۶۲۲۶۵	۴۸	-۰/۱۵	۰/۰۵۵	-۰/۲۰۵	۰/۰۲۰۸	۰/۰۰۶۹	۰/۱۶۶	-۱/۲۳۴
	۵-۱۵	۷۴۳۳۱۹	۱۲۲	۰/۵۰۳	-۰/۵۳	۱/۰۳۴	۰/۰۰۸۱	۰/۰۱۴۴	۰/۱۵	۶/۸۶۴
	۱۵-۲۵	۳۸۱۴۶۴	۱۸	-۰/۷۶۱	۰/۱۲۶	-۰/۸۸۷	۰/۰۵۵۵	۰/۰۰۵۷	۰/۲۴۷	-۳/۵۸۳
	۲۵-۳۵	۱۸۲۱۱۳	۳	-۱/۷۹۵	۰/۰۸۳	-۱/۸۷۸	۰/۳۳۳	۰/۰۰۵۳	۰/۵۸۱	-۳/۲۲۸
	بیشتر از ۳۵	۴۹۳۷۶	۰	-	۰/۰۲۵۹	-	-	۰/۰۰۵۲	-	-
انحنای سطح	مقعر	۲۹۶۱۹۱	۳۸	۰/۲۵۷	-۰/۰۵۴۸	۰/۳۱۲	۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۰۶	۰/۱۸۱	۱/۷۲۱
	مسطح محدب	۱۱۸۹۶۰ ۴۳۹۷۴۴	۱۲۹ ۲۴	۰/۰۸۹ -۰/۵۹۷	-۰/۱۶۳ ۰/۱۲۵	۰/۲۵۲ -۰/۷۲۲	۰/۰۰۷۷ ۰/۰۴۱۶	۰/۰۱۶۱ ۰/۰۰۵۹	۰/۱۵۴ ۰/۲۱۸	۱/۶۳۳ -۳/۳۰۹
جهت شیب	هموار	۱۸۹۸۰	۲	۰/۰۶	-۰/۰۰۰۶	۰/۰۶۱	۰/۵	۰/۰۰۰۵	۰/۷۱	۰/۰۸۵
	شمال	۲۸۴۶۲۸	۳۳	۰/۱۵۶	-۰/۰۲۹	۰/۱۸۵	۰/۰۳	۰/۰۰۰۶	۰/۱۹۱	۰/۹۷
	شمال شرق	۲۷۳۸۲۶	۲۶	-۰/۰۴۳	۰/۰۰۷	-۰/۰۵	۰/۰۳۸	۰/۰۰۰۶	۰/۲۱۱	-۰/۲۴
	شرق	۲۱۳۴۰۴	۱۷	-۰/۲۱۹	۰/۰۲۴	-۰/۲۴۳	۰/۰۵۸	۰/۰۰۵۷	۰/۲۵۴	-۰/۹۵
	جنوب شرق	۲۰۹۰۰۲	۱۰	-۰/۷۲۹	۰/۰۶۱۱	-۰/۷۹	۰/۱	۰/۰۰۵۵	۰/۳۲۴	-۲/۴۳
	جنوب	۲۳۹۶۲۶	۲۱	-۰/۱۲۳	۰/۰۱۶۴	-۰/۱۴	۰/۰۴۷	۰/۰۰۵۸	۰/۲۳۱	-۰/۶
	جنوب غرب	۲۳۴۹۴۵	۳۰	۰/۲۵۲	-۰/۰۴	۰/۲۹۳	۰/۰۳۳	۰/۰۰۶۲	۰/۱۹۸	۱/۴۷
	غرب	۲۱۷۶۳۱	۲۵	۰/۱۴۶	-۰/۰۲	۰/۱۶۷	۰/۰۴	۰/۰۰۰۶	۰/۲۱۴	۰/۷۷۸
	شمال غرب	۲۳۳۴۹۵	۲۷	۰/۱۵۳	-۰/۰۲۳	۰/۱۷۶	۰/۰۳۷	۰/۰۰۰۶	۰/۲۰۷	۰/۸۴۹
طول شیب	کمتر از ۵	۹۹۶۵۵۹	۹۷	-۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۹۸	-۰/۰۳۸	۰/۰۱۰۳	۰/۰۱۰۶	۰/۱۴۴	-۰/۲۶۸
	۵-۱۰	۳۶۲۱۹۳	۶۷	۰/۶۲۳	-۰/۲۲۳	۰/۸۴۶	۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۰۸	۰/۱۵۱	۵/۵۸۵
	۱۰-۱۵	۲۴۱۹۱۹	۱۶	-۰/۴۰۵	۰/۰۴۶	-۰/۴۵۲	۰/۰۶۲۵	۰/۰۰۵۷	۰/۲۶۱	-۱/۷۳۱
	۱۵-۲۰	۱۵۱۱۸۳	۱۰	-۰/۴۵۰	۰/۰۳۱۹	-۰/۴۸۲	۰/۱	۰/۰۰۵۵	۰/۳۲۴	-۱/۴۸۵
	بیشتر از ۲۰	۱۶۶۶۸۳	۱	-۲/۸	۰/۰۸۵۳	-۲/۸۹	۱/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۵۲	۱/۰۰۰۲۶	-۲/۸۸۳
کاربری اراضی	مناطق مسکونی	۲۳۱۵۷	۳	۰/۲۶۷	-۰/۰۰۳۷	۰/۲۷۱	۰/۳۳۸	۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۵۸۱	۰/۴۶۵
	مرتع	۸۸۶۸۴۳	۴۵	-۰/۶۷	۰/۳۴۸	-۱/۰۱۸	۰/۰۲۹	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۱۷	-۵/۹۷
	کشاورزی	۶۹۱۰۸۹	۷۰	۰/۰۲۱۲	-۰/۰۱۲	۰/۰۳۳۲	۰/۰۲۲۵	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۱۵	۰/۲۲۱
	جنگل	۳۱۲۰۵۶	۷۳	۰/۸۵۸	-۰/۳۰۴	۱/۱۶۳	۰/۰۲۲۱	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۱۴۸	۷/۸۱۱
	پهنه‌های آبی	۲۸۶۷	۰	-	۰/۰۰۱۵	-	-	۰/۰۰۰۰۳۴	-	-
	زمین بایر	۱۰۰۸۹	۰	-	۰/۰۰۵۲	-	-	۰/۰۰۰۰۱	-	-

ادامه جدول ۱.

معیار	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد چشمه	W ⁺	W ⁻	C	S ⁺ W ⁺	S ⁺ W ⁻	S(C)	W _{final}
شاخص رطوبت توپوگرافی	کمتر از ۲	۵۶	۰	-	۰/۰۰۰۲۹	-	-	۰/۰۰۰۵۲	-	-
	۲-۴	۶۵۱۵۸۴	۱۸	-۱/۲۷۸	۰/۳۱۴	-۱/۵۹۲	۰/۰۵۵	۰/۰۰۰۵۷	۰/۲۴۷	-۶/۴۳
	۴-۶	۱۰۷۴۶۲	۱۶۴	۰/۴۳	-۱/۱۳۹	۱/۵۷	۰/۰۰۰۶	۰/۰۳۷	۰/۲۰۷	۷/۵۶۲
	بیشتر از ۶	۱۹۹۲۷۷	۹	-۰/۷۸۶	۰/۰۶	-۰/۸۴۷	۰/۱۱۱	۰/۰۰۰۵۴	۰/۳۴۱	-۲/۴۸۲
فاصله از رودخانه	کمتر از ۱۰۰	۱۳۷۰۷۳	۳۵	۰/۹۴۵	-۰/۱۲۸	۱/۰۷۴	۰/۰۲۸۵	۰/۰۰۰۶۴	۰/۱۸۷	۵/۷۴
	۱۰۰-۲۰۰	۱۲۴۷۸۵	۱۶	۰/۲۵۷	-۰/۰۲	۰/۲۷۷	۰/۰۶۲۵	۰/۰۰۰۵۷	۰/۲۶۱	۱/۰۶۲
	۲۰۰-۳۰۰	۱۳۲۸۸۳	۱۰	-۰/۲۷۵	۰/۰۱۷۷	-۰/۲۹۳	۰/۱۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵۵	۰/۳۲۴	-۰/۹۰۳
	۳۰۰-۴۰۰	۱۱۷۳۶۲	۱۰	-۰/۱۵۱	۰/۰۰۰۹	-۰/۱۶	۰/۱۰۰۰۹	۰/۰۰۰۵۵	۰/۳۲۴	-۰/۴۹۴
	بیشتر از ۴۰۰	۱۴۱۴۰۰	۱۲۰	-۰/۱۵۵	۰/۳۳۵	-۰/۴۹	۰/۰۰۰۸۳	۰/۰۱۴	۰/۱۴۹	-۳/۲۷۸
انحنای آبراهه	کمتر از ۰/۰۰۱	۶۲۲۲۰۱	۴۸	-۰/۲۵۱	۰/۱	-۰/۳۵۲	۰/۰۲۷۸	۰/۰۰۰۰۲	۰/۱۶۸	-۲/۱۱۱
	۰/۰۰۱-۰/۰۰۱	۹۸۰۱۱۸	۱۱۰	۰/۱۲۳	-۰/۱۴۶	۰/۲۷	۰/۰۲۱۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۱۴۶	۱/۸۴۴
	بیشتر از ۰/۰۰۱	۳۲۳۲۱۸	۳۳	۰/۰۲۸	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۳۴۸	۰/۰۳۶۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۱۹۱	۰/۱۸۱
فاصله از گسل	کمتر از ۲۵۰	۱۷۶۹۸۱	۳۱	۰/۵۶۹	-۰/۰۰۸	۰/۶۴۹	۰/۰۳۲۲	۰/۰۰۰۶۲	۰/۱۹۶	۳/۳۱
	۲۵۰-۵۰۰	۱۶۶۱۰۷	۳۳	۰/۶۹۴	-۰/۰۹۹	۰/۷۹۴	۰/۰۳۰۳	۰/۰۰۰۶۳	۰/۱۹۱	۴/۱۵
	۵۰۰-۷۵۰	۱۵۴۷۹۲	۱۹	۰/۲۱۳	-۰/۰۲۱	۰/۲۳۴	۰/۰۵۲	۰/۰۰۰۵۸	۰/۲۴۱	۰/۹۶۹
	۷۵۰-۱۰۰۰	۱۳۸۸۶۰	۲۲	۰/۴۶۸	-۰/۰۴۷	۰/۵۱۶	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰۵۹	۰/۲۲۶	۲/۲۷۷
	بیشتر از ۱۰۰۰	۱۲۸۹۳۶	۸۶	-۰/۳۹۶	۰/۵۰۸	-۰/۹۰۵	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۰۹۵	۰/۱۴۵	-۶/۲۲۴
تراکم زهکشی	کمتر از ۰/۱۹۳	۵۹۹۴۹۴	۵۲	-۰/۱۳۳	۰/۰۵۵	-۰/۱۸۸	۰/۰۱۹۲	۰/۰۰۰۷۱	۰/۱۶۲	-۱/۱۶۲
	۰/۰-۱۹۳/۴۹۸	۷۱۸۲۱۴	۶۱	-۰/۱۵۴	۰/۰۸۱۸	-۰/۲۳۶	۰/۰۱۶۳	۰/۰۰۰۷۶	۰/۱۵۵	-۱/۵۲۵
	۰/۰-۴۹۸/۸۵۵	۳۵۸۳۵۲	۵۵	۰/۴۳۶	-۰/۱۳۳	۰/۵۷	۰/۰۱۸۱	۰/۰۰۰۷۳	۰/۱۵۹	۳/۵۷
	۰/۱-۸۵۵/۳۹۴	۱۶۲۶۲۶	۱۹	۰/۱۶۳	-۰/۰۱۶۵	۰/۱۸	۰/۰۵۲۶	۰/۰۰۰۵۸	۰/۲۴۱	۰/۷۴۶
	بیشتر از ۱/۳۹۴	۸۷۴۱۷	۴	-۰/۷۷۳	۰/۰۲۵۲	-۰/۷۹۸	۰/۲۵	۰/۰۰۰۵۳	۰/۵۰۵	-۱/۵۸
سنگ‌شناسی	گروه ۱	۷۰۳۱۷۷	۴۲	-۰/۵۰۶	۰/۲۰۵	-۰/۷۱۲	۰/۰۲۳۸	۰/۰۰۰۶۷	۰/۱۷۴	-۴/۰۸
	گروه ۲	۴۳۰۹۸۲	۶۸	۰/۴۶۴	-۰/۱۸۶	۰/۶۵۱	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۰۸۱	۰/۱۵۱	۴/۳۰
	گروه ۳	۲۹۶۶۴۶	۱۰	-۱/۰۷۹	۰/۱۱۳	-۱/۱۹۲	۰/۱	۰/۰۰۰۵۵	۰/۳۲۴	-۳/۶۷
	گروه ۴	۵۱۹۴۷	۲۱	۱/۴۰۵	-۰/۰۸۹	۱/۴۹۴	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰۵۸	۰/۲۳۱	۶/۴۶
	گروه ۵	۲۱۲۹۴	۰	-	۰/۰۱۱	-	-	۰/۰۰۰۵۲	-	-
	گروه ۶	۱۲۳۱۵	۰	-	۰/۰۰۰۶	-	-	۰/۰۰۰۵۲	-	-
	گروه ۷	۲۳۹۲۳۸	۴۰	۰/۵۲۲	-۰/۱۰۲	۰/۶۲۴	۰/۰۲۵	۰/۰۰۰۶۶	۰/۱۷۷	۳/۵۱۳
	گروه ۸	۸۶۸۷۸	۸	-۰/۰۷۴	۰/۰۰۳۳	-۰/۰۷۷	۰/۱۲۵	۰/۰۰۰۵۴	۰/۳۶۱	-۰/۲۱۴
	گروه ۹	۲۳۵۷۴	۰	-	۰/۰۱۲۳	-	-	۰/۰۰۰۵۲	-	-
	گروه ۱۰	۳۲۷۹۹	۲	-۰/۴۸۶	۰/۰۰۶۶	-۰/۴۹۲	۰/۵	۰/۰۰۰۵۲	۰/۷۱	-۰/۶۹۳
	گروه ۱۱	۲۷۲۵۱	۰	۰	۰/۰۱۴۲	-	-	۰/۰۰۰۵۲	-	-

ادامه جدول ۱.

W_{final}	S(C)	S^2W^-	S^2W^+	C	W^-	W^+	تعداد چشمه	تعداد پیکسل	طبقه	معیار
-۵/۹۹۷	۰/۱۵۴	۰/۰۰۷۷	۰/۰۱۶	-۰/۹۲۶	۰/۴۰۲	-۰/۵۲۴	۶۲	۱۰۵۶۲۱	کمتر از ۱۶	تراکم گسل
۱/۹۴۱	۰/۱۶۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۲	۰/۳۲۳	-۰/۰۷۲	۰/۲۵۱	۴۸	۳۷۶۳۱۵	۰/۰-۱۶/۴۸	
۳/۷۱	۰/۱۶۴	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۶۱	-۰/۱۲۷	۰/۴۸۳	۵۰	۳۱۰۹۵۷	۰/۰-۴۸/۷۹	
۳/۷	۰/۲۱۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۷۹۴	-۰/۰۷۴	۰/۷۲۰	۲۵	۱۲۲۷۰۹	۰/۱-۷۹/۱۲	
۰/۰۲۴	۰/۴۱۴	۰/۰۰۵۴	۰/۱۶۶	۰/۰۱۰۱	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۹۸	۶	۵۹۹۱۲	بیشتر از ۱/۱۲	
-۳/۲۵۷	۰/۲۸۷	۰/۰۰۵۶	۰/۰۷۷	-۰/۹۳۵	۰/۱۰۰۲	-۰/۸۳۵	۱۳	۳۰۲۲۴۴	کمتر از ۱۰۰	شاخص توان آبراهه
-۲/۱۰۹	۰/۳۱۰	۰/۰۰۵۵	۰/۰۹۰۹	-۰/۶۵۵	۰/۰۵۱۹	-۰/۶۰۳	۱۱	۲۰۲۷۴۰	۱۰۰-۲۰۰	
-۱/۸۷۱	۰/۳۸۵	۰/۰۰۵۴	۰/۱۴۲	-۰/۷۲۰	۰/۰۳۷۹	-۰/۶۸۲	۷	۱۳۹۶۷۵	۲۰۰-۳۰۰	
-۰/۷۹۱	۰/۳۶۱	۰/۰۰۵۴	۰/۱۲۵	-۰/۲۸۵	۰/۰۱۳۷	-۰/۲۷۲	۸	۱۰۵۸۶۰	۳۰۰-۴۰۰	
۵/۰۸۱	۰/۱۷۹	۰/۰۲۵	۰/۰۰۶۵۸	۰/۹۱۲	-۰/۶۴۶	۰/۲۶۵	۱۵۲	۱۱۷۵۰۲	بیشتر از ۴۰۰	



شکل ۳. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حاصل از مدل وزن شاهد

وزن شاهد به دست آمد (شکل ۳).

نتایج حاصل از ترکیب وزن شاهد با رگرسیون لجستیک

به منظور پیاده‌سازی مدل رگرسیون لجستیک، از وزن‌های به دست آمده از مدل وزن شاهد استفاده شد. به منظور اجرای

با مقادیر ۷/۸۱۱، ۰/۴۶۵ و ۰/۲۲۱ هستند. بقیه طبقه‌های مربوط به کاربری اراضی تأثیر کمتری بر حضور آب زیرزمینی داشتند. در نهایت در محیط ArcGIS با جمع جبری نقشه‌های وزنی حاصل از اعمال ضرایب وزنی (W_{final}) هر طبقه از ۱۴ نقشه عامل (جدول ۱)، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حاصل از مدل

جدول ۲. ضرایب حاصل از مدل رگرسیون لجستیک

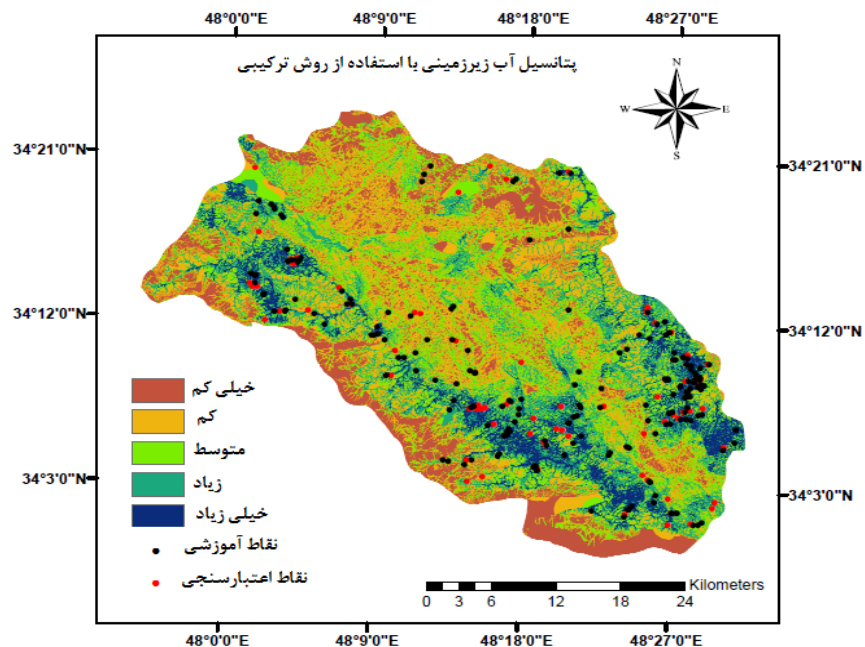
معیار	ضریب	انحراف معیار
مقدار ثابت	۰/۳۷۶	۰/۰۳۷
جهت شیب	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹
ارتفاع	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶
تراکم گسل	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷
تراکم زهکشی	۰/۰۲۶	۰/۰۱۱
فاصله از گسل	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷
سنگ‌شناسی	۰/۰۲۶	۰/۰۰۷
کاربری اراضی	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴
طول شیب	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹
انحنای سطح	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
انحنای آبراهه	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴
فاصله از رودخانه	۰/۰۱۷	۰/۰۰۷
زاویه شیب	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶
شاخص توان آبراهه	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷
شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۰۲	۰/۰۰۴

نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها

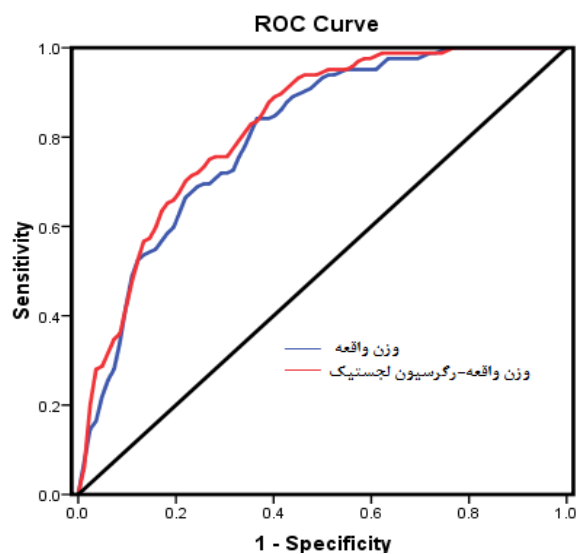
به منظور ارزیابی مدل‌ها از منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر آن استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده دقت ۸۰/۴ درصد برای مدل وزن شاهد و دقت ۸۲/۵ درصد برای ترکیب مدل وزن شاهد و رگرسیون لجستیک است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده دقت خیلی خوب (۰/۸-۰/۹) این دو مدل در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی است. نمودار ROC مربوط به مدل‌ها در شکل (۵) و مساحت زیر منحنی (AUC) به همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان مدل‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، طبقه ارتفاعی پایین (۱۸۰۰-۲۲۰۰) بیشترین مقدار چشمه را در خود جای داده است، بنابراین هر چه اختلاف ارتفاع نسبت به میانگین ارتفاع محل‌های تخلیه کمتر باشد، مطلوبیت بالاتری در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی دارا خواهد بود و اینکه مناطق با پتانسیل بالا بیشتر منطبق بر ارتفاعات پایین است که دلیل این امر شیب کمتر نسبت به ارتفاعات، کم بودن تراکم زهکشی و تراس‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌ها در این طبقه و در نتیجه نفوذ بیشتر و امکان ورود آب زیرزمینی از طریق درز و شکاف‌ها را به این سطح از طبقه ارتفاعی فراهم می‌کند. بررسی عامل زاویه شیب نشان داد که بیشترین تعداد وقوع چشمه مربوط به طبقات پایین شیب است. مناطقی که دارای شیب پایینی هستند آب را برای مدت طولانی حفظ می‌کنند، این امر باعث نفوذ یا تغذیه بیشتر آب می‌شود، ولی نواحی با شیب بالا دارای مقادیر زیادی رواناب هستند و مقدار نفوذ در آنها کم است. وجود رابطه معکوس بین فاصله از گسل و تعداد چشمه نیز از دیگر نتایج پژوهش حاضر است. این نتیجه بدان معناست که هر چه فاصله از گسل کمتر باشد، تعداد چشمه بیشتر است. دلیل این امر، تراکم شکستگی است که معیاری برای خردشدگی سازنده است. آبراهه‌ها نقش انتقال رواناب را داشته و در فواصل نزدیک‌تر به رودخانه، تعداد چشمه‌های بیشتری قرار دارد. پوشش گیاهی بر میزان نفوذ از سطح مؤثر است به طوری که بیشترین نفوذپذیری در مناطق جنگلی روی می‌دهد. نتایج

مدل در نرم‌افزار SPSS، ابتدا لایه‌های وزنی حاصل از مدل وزن شاهد به فرمت ASCII تبدیل و به نرم‌افزار SPSS منتقل شد و ضرایب هر معیار مطابق جدول (۲) محاسبه شد. ضرایب مثبت نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل بیشتری در پتانسیل آب زیرزمینی دارند و همچنین ضرایب منفی نشان‌دهنده احتمال کمتر متغیرهای مستقل در پتانسیل آب زیرزمینی است (۳۶). با توجه به نتایج به دست آمده از این مدل، همه معیارها دارای تأثیر مثبت در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی است. بر اساس ضرایب به دست آمده بیشترین تأثیر را به ترتیب تراکم زهکشی و سنگ‌شناسی و کمترین تأثیر را تراکم گسل و زاویه شیب در پتانسیل آب زیرزمینی دارند (جدول ۲). در نهایت با استفاده از ضرایب وزنی حاصل از جدول (۱ و ۲) و اعمال آنها در هر طبقه از نقشه‌های عامل در محیط ArcGIS، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حاصل از ترکیب مدل وزن شاهد با رگرسیون لجستیک به دست آمد (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حاصل از ترکیب مدل وزن شاهد با رگرسیون لجستیک



شکل ۵. منحنی نرخ پیش‌بینی ROC نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل وزن شاهد و ترکیب وزن شاهد و رگرسیون لجستیک

جدول ۳. مساحت زیر منحنی تشخیص عملکرد نسبی به همراه استاندارد و سطح اطمینان آن

فواصل اطمینان در سطح ۹۵ درصد		سطح اطمینان	خطای استاندارد	سطح زیر منحنی	روش احتمالاتی
حد بالا	حد پایین				
۰/۸۷۱	۰/۷۳۷	۰/۰۰۰	۰/۰۳۴	۰/۸۰۴	وزن شاهد
۰/۸۸۸	۰/۷۶۲	۰/۰۰۰	۰/۰۳۲	۰/۸۲۵	وزن شاهد- رگرسیون لجستیک

نتیجه گیری

آب زیرزمینی به عنوان یکی از منابع طبیعی مهم در نظر گرفته می شود و توزیع مکانی آب زیرزمینی با استفاده از نقشه های پتانسیل آب زیرزمینی می تواند پیش بینی و مشخص شود. در این پژوهش از ترکیب روش های آماری وزن شاهد و رگرسیون لجستیک برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در شهرستان نهاوند، استان همدان استفاده شده است. در ابتدا نقشه پراکنش چشمه شامل ۲۷۳ محل وقوع چشمه در شهرستان نهاوند، استان همدان و سپس ۱۴ معیار تأثیرگذار بر آب زیرزمینی در محیط GIS آماده شد. بدین منظور از ۲۷۳ محل وقوع چشمه، ۱۹۱ محل (۷۰ درصد) به عنوان داده های آموزشی به منظور مدل سازی و ۸۲ محل (۳۰ درصد) برای ارزیابی با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی استفاده شد. دقت های به دست آمده از روش های وزن شاهد و ترکیب وزن شاهد و رگرسیون لجستیک به ترتیب ۸۰/۴ درصد و ۸۲/۵ درصد است. همچنین نتایج ارزیابی مدل های مد نظر نشان دهنده دقت بالاتر مدل ترکیبی نسبت به هر یک از مدل ها به تنهایی است. بنابراین به عنوان پیشنهاد می توان گفت که نقشه های مذکور، می تواند نقش بسزایی در تصمیم گیری های آبی، مدیریت آب های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه داشته باشد.

به دست آمده از تراکم آبراهه و تراکم گسل نشان می دهد که با زیاد شدن مقادیر این دو لایه، تعداد چشمه ها کمتر می شود. با افزایش معیارهای SPI و TWI تعداد چشمه ها و مقدار نسبت فراوانی افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد که دقت ترکیب مدل وزن شاهد با رگرسیون لجستیک بیشتر از مدل وزن شاهد به تنهایی است. از مزایای مدل وزن شاهد، در نظر گرفتن رابطه بین طبقه های هر معیار است و از معایب این مدل نادیده گرفتن میزان تأثیر هر معیار در مدل سازی است. از طرفی دیگر مدل رگرسیون لجستیک میزان تأثیر هر معیار در مدل سازی را در نظر می گیرد و از معایب رگرسیون لجستیک نادیده گیری رابطه بین طبقه های هر معیار است. بنابراین با ترکیب مدل وزن شاهد و رگرسیون لجستیک می توان از مزایای هر یک از مدل ها در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی بهره گرفت. نتایج این پژوهش از نظر به کارگیری مدل آماری و احتمالاتی در راستای پژوهش های رضوی ترمه و همکاران (۲۹)، چن و همکاران (۴)، داودی مقدم و همکاران (۷) و نقیعی و همکاران (۲۰) به طور کلی با موفقیت به همراه است. همه افراد مذکور استفاده از مدل های پیشنهادی را در شناسایی مناطق مستعد آب زیرزمینی کارآمد می دانند. این پژوهش از این نظر نیز پژوهش های لی و همکاران (۱۴)، پیچ و همکاران (۲۴) و نفیسیگلو و همکاران (۲۱) را در ارجحیت به کارگیری مدل های تلفیقی نسبت به به کارگیری مدل ها به تنهایی را تأیید می کند.

منابع مورد استفاده

1. Arkoprovo, B., J. Adarsa and S. S. Prakash. 2012. Delineation of groundwater potential zones using satellite remote sensing and geographic information system techniques: a case study from Ganjam district, Orissa, India. *Research Journal of Recent Sciences* 1(9): 59-66.
2. Bonham Carter, G. 1991. Integration of geoscientific data using GIS. *Geographic information systems: principle and applications* Longdom, London.
3. Bonham Carter, G. F. 1994. Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. *Computer methods in the geoscientists* 13(398).
4. Chen, W, H. R. Pourghasemi and Z. Zhao. 2016. A GIS based comparative study of Dempster-Shafer, logistic regression, and artificial neural network models for landslide susceptibility mapping. *Geocarto International* 11: 408-24.
5. Chenini, I., A. B. Mammou and M. May. 2010. Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resource Management* 24(5): 921-39.
6. Chowdhury, A., M. Jha, V. Chowdary and B. Mal. 2009. Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India. *International Journal of Remote*

- Sensing* 30(1): 231-50.
7. Davoodi Moghaddam, D, M. Rezaei, H. R. Pourghasemi, Z. S. Pourtaghi and B. Pradhan. 2015. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arabian Journal of Geoscience* 8(2): 913-929.
 8. Dixon, B. 2009. A case study using SVM, NN and logistic regression in a GIS to predict wells contaminated with Nitrate-N. *Hydrogeology Journal* 17(6): 1520-1527.
 9. Ganapuram, S., G. V. Kumar, I. M. Krishna, E. Kahya and M. C. Demirel. 2009. Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Advance in Engineering Software* 40(7): 506-18.
 10. Hu, Z. and C. Lo. 2007. Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems* 31(6): 667-88.
 11. Israil, M., M. Al-hadithi and D. Singhal. 2006. Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area: Himalayan foothill region, India. *Hydrogeology Journal* 14: 753-9.
 12. Jaafari, A., A. Najafi, H. R. Pourghasemi, J. Rezaeian and A. Sattarian. 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology* 11(4): 909-26.
 13. Jha, M. K., A. Chowdhury, V. Chowdary and S. Peiffer. 2007. Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. *Water Resource Management* 21(2): 427-67.
 14. Khosroshahi, SH. 2014. Groundwater assessment using GIS (Study area: Kalachai region). MSc. Thesis, University of Tabriz.
 15. Lee, M. J., I. Park and S. Lee. 2015. Forecasting and validation of landslide susceptibility using an integration of frequency ratio and neuro-fuzzy models: a case study of Seorak mountain area in Korea. *Environmental Earth Science* 74(1): 413-29.
 16. Lee, M. J., J. E. Kang and S. Jeon. 2012. Application of frequency ratio model and validation for predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. In: Proceeding of the 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. pp. 895-898.
 17. Lee, S., K. Song and Y. Kim and I. Park. 2012. Regional groundwater productivity potential mapping using a geographic information system (GIS) based artificial neural network model. *Hydrogeology Journal* 20(8): 1511-1527.
 18. Manap, M. A., H. Nampak, B. Pradhan, S. Lee, W. N. A. Sulaiman and M. F. Ramli. 2014. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geoscience* 7(2): 711-24.
 19. Manap, M. A., W. N. A. Sulaiman, M. F. Ramli, B. Pradhan and N. Surip. 2013. A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal of Geoscience* 6(5): 1621-37.
 20. Moore, I. D., R. Grayson and A. Ladson. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrology Process* 5(1): 3-30.
 21. Naghibi, S. A., H. R. Pourghasemi, Z. S. Pourtaghi and A. Rezaei. 2015. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics* 8(1): 171-86.
 22. Nefeslioglu, H., C. Gokceoglu, H. Sonmez. 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology* 97(3): 171-91.
 23. Oh, H. J., Y. S. Kim, J. K. Choi, E. Park and S. Lee. 2011. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology* 399(3): 158-72.
 24. Ozdemir, A. 2011. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology* 411(3): 290-308.
 25. Page, M., B. Berjamy, Y. Fakir, F. Bourgin, J. Jarlan, A. Abourida and et al. 2012. An integrated DSS for groundwater management based on remote sensing: the case of a semi-arid aquifer in Morocco. *Water Resource Management* 26: 3209-30.
 26. Pourtaghi, Z. S. and H. R. Pourghasemi. 2014. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal* 22(3): 643-62.
 27. Pradhan, B. 2009. Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Open Geoscience* 1(1): 120-9.
 28. Rahmati, O., A. N. Samani, M. Mahdavi, H. R. Pourghasemi and H. Zeinivand. 2015. Groundwater potential

- mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geoscience* 8(9): 7059-71.
29. Razavi Termeh, S., M. Mesgari and K. Kazemi. 2017. Evaluation and comparison of frequency ratio, statistic index and entropy methods for groundwater potential mapping using GIS (Case Study: Jahrom Township). *Iranian Journal of Ecohydrology* 4(3): 725-736. (In Farsi).
30. Regmi, A. D., K. C. Devkota, K. Yoshida, B. Pradhan, H. R. Pourghasemi, T. Kumamoto and et al. 2014. 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 Geoscience* 7(2): 725-42.
31. Shafiey Dastjerdi, A. and K. Shirani. 2017. Delineation of sites proper for artificial recharge using rockworks software. *Water Engendering* 9(30): 1-12 (In Farsi).
32. Shahid, S., S. Nath and J. Roy. 2000. Groundwater potential modelling in a soft rock area using a GIS. *International Journal of Remote Sensing* 21(9): 1919-24.
33. Shirani, K. 2017. Modelling of Landslide susceptibility zonation using shannon's entropy index and weight of evidence model (case study: Sarkhoon's Karoon). *Journal of Water and Soil Science* 21(1): 51-68. (In Farsi).
34. Shirani, K. and A. R. Arabameri. 2015. Landslide hazard zonation using logistic regression method (case study: Dez-e-Oulia basin). *Journal of Water and Soil Science* 19(72): 321-335. (In Farsi).
35. Shirani, K., M. Pasandi and A. Arabameri. 2018. Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran. *Natural Hazards* 93(3): 1379-1418.
36. Solaimani, K., S. Z. Mousavi and A. Kavian. Landslide susceptibility mapping based on frequency ratio and logistic regression models. *Arabian Journal of Geoscience* 6: 2557-69.
37. Zabihi, M., H. Pourghasemi and M. Behzadfar. 2015. Groundwater potential mapping using shannon's entropy and random forest models in the bojnourd township. *Iranian Journal of Ecohydrology* 2(2): 221-232. (In Farsi).

Groundwater Potential Mapping Using the Integration of the Weight of Evidence and Logistic Regression Models (A Case Study: Nahavand)

S. V. Razavi Termeh¹, K. Shirani^{2*} and M. Soltani Rabii³

(Received: January 19-2018 ; Accepted: April 29-2018)

Abstract

Today, supplying water to meet the sustainable development goals is one of the most important concerns and challenges in most countries. Therefore, identification of the areas with groundwater potential is an important tool for conservation, management and exploitation of water resources. The purpose of this research was to prepare the potential groundwater map in Nahavand, Hamedan Province, using the weight of evidence model and combining it with logistic regression. For this purpose, the information layers of slope angle, slope aspect, slope length, altitude, plan curvature, profile curvature, TWI, SPI, distance from fault, fault density, distance from river, drainage density, lithology and land use were identified as the factors affecting groundwater potential and digitized in the ArcGIS software. After designing the groundwater potential map with these three methods, ROCs were used to evaluate the results. Of 273 springs identified in this study, 191 (70%) were used to prepare the groundwater potential map and 82 springs (30%) were used to evaluate the model. The area under curve (AUC) obtained from the ROC curve showed an accuracy of 80.4% for the weight of evidence model and 82.5% for the weight of the evidence- regression combined model

Keywords: Spatial prediction, Spring, Statistics models, Nahavand town

1. Department of GIS and RS, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.
3. Department of GIS and RS, Faculty of Engineering and Thechnical, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: K.Shirani@areeo.ac.ir