

## ارزیابی و مقایسه روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان جهرم)

سید وحید رضوی ترمه<sup>۱</sup>، محمد سعدی مسگری<sup>۲\*</sup>، کاظم کاظمی<sup>۱</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد GIS، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۲. دانشیار گروه سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۲۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۱/۳۰)

### چکیده

آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع ارزشمند تازه آب در نظر گرفته می‌شود. با افزایش سریع جمعیت انسان، تقاضا برای آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است. تهیه نقشه مناطق بالقوه آب زیرزمینی می‌تواند کمک شایان توجهی به تعیین، محافظت و مدیریت چشمه‌های آب زیرزمینی کند. هدف از این تحقیق، تهیه نقشه پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی در شهرستان جهرم با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی است. نوآوری تحقیق حاضر، به‌کارگیری روش شاخص آماری برای اولین بار به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی و مقایسه آن با دو روش آنتروپی و نسبت فراوانی است. دوازده معیار هیدرولوژی، زمین‌شناسی و جغرافیای طبیعی که بر موقعیت چشمه‌ها اثر می‌گذارند، در نظر گرفته شد و در محیط ArcGIS این داده‌ها پردازش و آماده شد. این معیارها شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، شاخص توپوگرافی رطوبت (TWI)، طول شیب، شاخص توان آبراهه (SPI)، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، تراکم گسل، کاربری اراضی و زمین‌شناسی است. پس از تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی با این سه روش، برای ارزیابی نتایج از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. از ۱۰۳ چشمه معرفی شده در این تحقیق، ۷۳ چشمه (۷۰ درصد) برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی و ۳۰ چشمه (۳۰ درصد) برای ارزیابی مدل استفاده شد. سطح زیرمنحنی (AUC) به‌دست‌آمده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی، نشان‌دهنده دقت ۹۱ درصد برای مدل شاخص آماری، دقت ۹۲ درصد برای مدل نسبت فراوانی و دقت ۹۲/۷ برای مدل آنتروپی برآورد شد. نتایج این ارزیابی نشان‌دهنده دقت عالی برای این سه مدل و برتری مدل آنتروپی نسبت به دو مدل دیگر است. همچنین بر اساس مدل آنتروپی لایه‌های شاخص توان آبراهه، ارتفاع، شیب و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعه‌شده داشته‌اند.

**کلیدواژگان:** نقشه پتانسیل آب زیرزمینی، روش آنتروپی، روش نسبت فراوانی، روش شاخص آماری.

## مقدمه

آب یکی از منابع ضروری برای ادامه حیات بشر است. بزرگترین منبع آب قابل استفاده برای انسان، لایه‌های آب زیرزمینی است [۱]. افزایش بی‌رویه کشاورزی، مصارف صنعتی و فعالیت‌های خانگی در سال‌های اخیر سبب نیازمندی بیشتر برای دسترسی به آب‌های با کیفیتی بهتر است. آب زیرزمینی به‌علت توزیع گسترده‌ای که دارد اغلب برای مصرف ترجیح داده می‌شود [۲]. وقوع آب زیرزمینی در یک محل، یک مسئله تصادفی نیست و نتایج نشان می‌دهد این مسئله در تعامل با فاکتورهای آب و هوا، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، جغرافیای طبیعی و محیط زیست است. حرکات آب زیرزمینی اساساً به تخلخل و نفوذپذیری لایه‌های سطحی و صخره‌هایی بستگی دارد که در زیر آن قرار گرفته است [۳]. همچنین وقوع و حرکت آب زیرزمینی به‌علت بسیاری از معیارها مانند توپوگرافی، نوع خاک و لایه‌های زیر آن، تراکم شکستگی‌ها، شیب، شکل زمین، پوشش زمین، شرایط آب و هوایی و غیره در ارتباط است [۴-۸]. توصیف مناطق بالقوه آب‌های زیرزمینی یکی از الزامات اصلی در محافظت و مدیریت آب زیرزمینی است. نقشه‌های بالقوه آب زیرزمینی برای طراحان و مهندسانی بسیار مفید است که در جست‌وجوی مکان‌های مناسب برای استخراج این منابع هستند [۵]. روش‌های عادی که برای تهیه نقشه‌های بالقوه آب زیرزمینی استفاده می‌شود بیشتر بر اساس مشاهدات میدانی است [۷]. مطالعات بسیاری روی ارزیابی آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی و سنجش از دور انجام شده است که بسیاری از آنها مناطق بالقوه آب زیرزمینی را تعیین کرده‌اند [۹-۱۲] و نیز تحقیقات دیگری روی توسعه مدل‌های احتمالی کار کرده‌اند [۱۳-۱۷]. از جمله روش‌هایی که در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده شده‌اند می‌توان به مدل‌های نسبت فراوانی<sup>۱</sup>، وزن واقعه<sup>۲</sup>، رگرسیون لجستیک<sup>۳</sup> و آنتروپی<sup>۴</sup> اشاره کرد [۱۸-۲۰]. بدین منظور پورتنقی و پورقاسمی [۲۱] پتانسیل آب زیرزمینی را با استفاده از نقاط چشمه در شهرستان بیرجند ارزیابی کردند. بدین‌منظور ایشان از روش‌های

نسبت فراوانی، وزن واقعه و رگرسیون لجستیک در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند و نشان دادند روش نسبت فراوانی با مقدار سطح زیر منحنی (AUC<sup>۵</sup>) برابر ۷۵/۶۹ درصد بهترین عملکرد را داشته است. نقیبه و همکارانش [۲۲] از مدل نسبت فراوانی و آنتروپی به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه آبخیز مغان خراسان رضوی استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد مدل آنتروپی با سطح زیرمنحنی برابر ۹۱/۲۱ درصد کارایی بسیار مناسبی داشته است. ذبیحی و همکارانش [۲۳] از مدل آنتروپی و جنگل تصادفی<sup>۶</sup> به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در دشت بجنورد پرداختند که نتایج ایشان نشان داد مدل آنتروپی با سطح زیرمنحنی ۸۵/۵۵ درصد دقت زیادی نسبت به جنگل تصادفی داشته است.

هدف اصلی این تحقیق، تهیه نقشه‌های بالقوه آب زیرزمینی در شهرستان جهرم با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری<sup>۷</sup> و روش آنتروپی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مقایسه این روش‌هاست. از نوآوری‌های تحقیق حاضر به‌کارگیری روش شاخص آماری برای اولین بار در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی و مقایسه آن با دو مدل نسبت فراوانی و آنتروپی است. در فصل دوم مقاله منطقه مطالعه‌شده و در فصل سوم داده‌های استفاده‌شده و روش انجام تحقیق معرفی می‌شود. در فصل چهارم نتایج هر یک از روش‌ها بررسی و در فصل پنجم نتایج با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی ارزیابی می‌شود. فصل ششم نیز معطوف به نتیجه‌گیری‌ها و مباحث کلی است.

## منطقه مطالعه‌شده

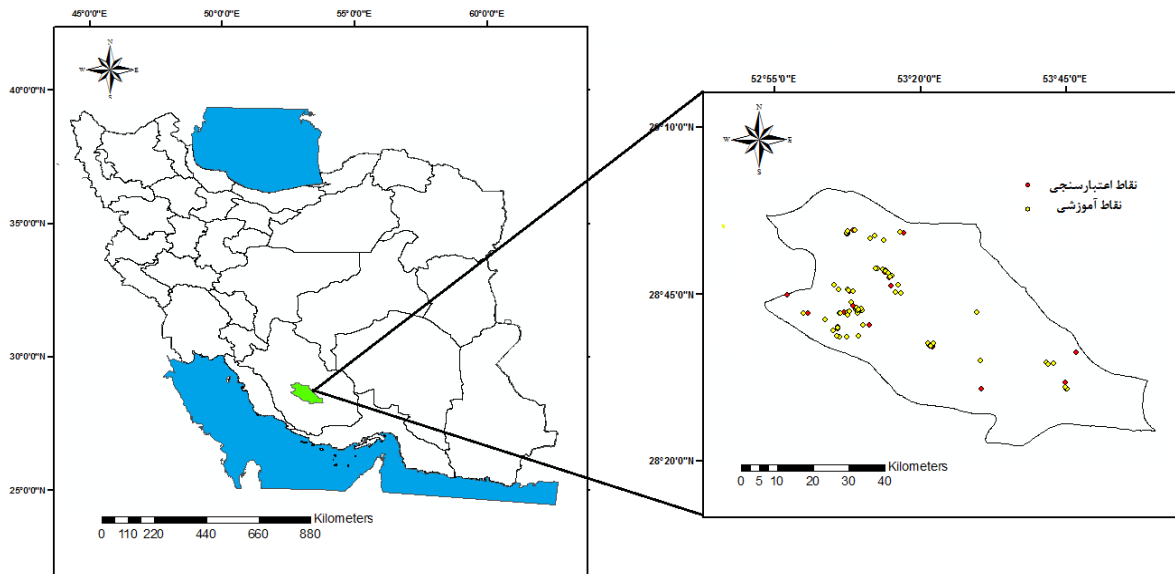
به‌دلیل مصرف زیاد آب در زمینه کشاورزی در شهرستان جهرم و پایین‌رفتن سطح آب زیرزمینی، هزینه‌های زیادی صرف استخراج منابع زیرزمینی آب می‌شود که از دلایل اصلی آن نبود مطالعات کافی در زمینه تهیه نقشه‌های بالقوه آب زیرزمینی و استفاده از این نقشه‌ها برای کشف، مدیریت و محافظت از این منابع است. شهرستان جهرم در استان فارس قرار دارد. مساحت این شهرستان ۵۷۳۷ کیلومتر مربع

1. Frequency Ratio
2. Weight of evidence
3. Logistic Regression
4. Entropy

5. Area under the curve
6. Random Forest
7. Statistic Index

تهیه نقشه بالقوه آب زیرزمینی و ۳۰ چشمه (۳۰ درصد) برای اعتبارسنجی مدل استفاده می‌شود. اطلاعات مربوط به موقعیت چشمه‌ها از سازمان آب شهرستان جهرم تهیه شد. منطقه مطالعه شده و چشمه‌های در نظر گرفته شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

است. این منطقه بین عرض‌های ۲۸ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۸ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴ دقیقه شرقی استقرار یافته است. ارتفاع بیشینه و کمینه منطقه مطالعه شده به ترتیب ۳۱۷۰ و ۷۵۹ متر است. در مجموع، ۱۰۳ چشمه در شهرستان جهرم وجود دارد که ۷۳ چشمه (۷۰ درصد) برای



شکل ۱. منطقه مطالعه شده و موقعیت چشمه‌ها

اخذ شد. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد و لایه‌های فاصله از گسل و تراکم گسل نیز از آن استخراج شد. عوامل فاصله از رودخانه و فاصله از جاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه تهیه شد. این لایه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

طول شیب توسط Moor و Burch ارائه شده است که در معادله ۱ نشان داده شده است. شاخص توان آبراهه و رطوبت توپوگرافی توسط Moor ارائه و در معادلات ۲ و ۳ ارائه نشان داده شده است [۲۴].

$$LS = \left( \frac{B_s}{22/13} \right)^{-1/6} \left( \frac{\sin \alpha}{0.0896} \right)^{1/3} \quad (1)$$

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

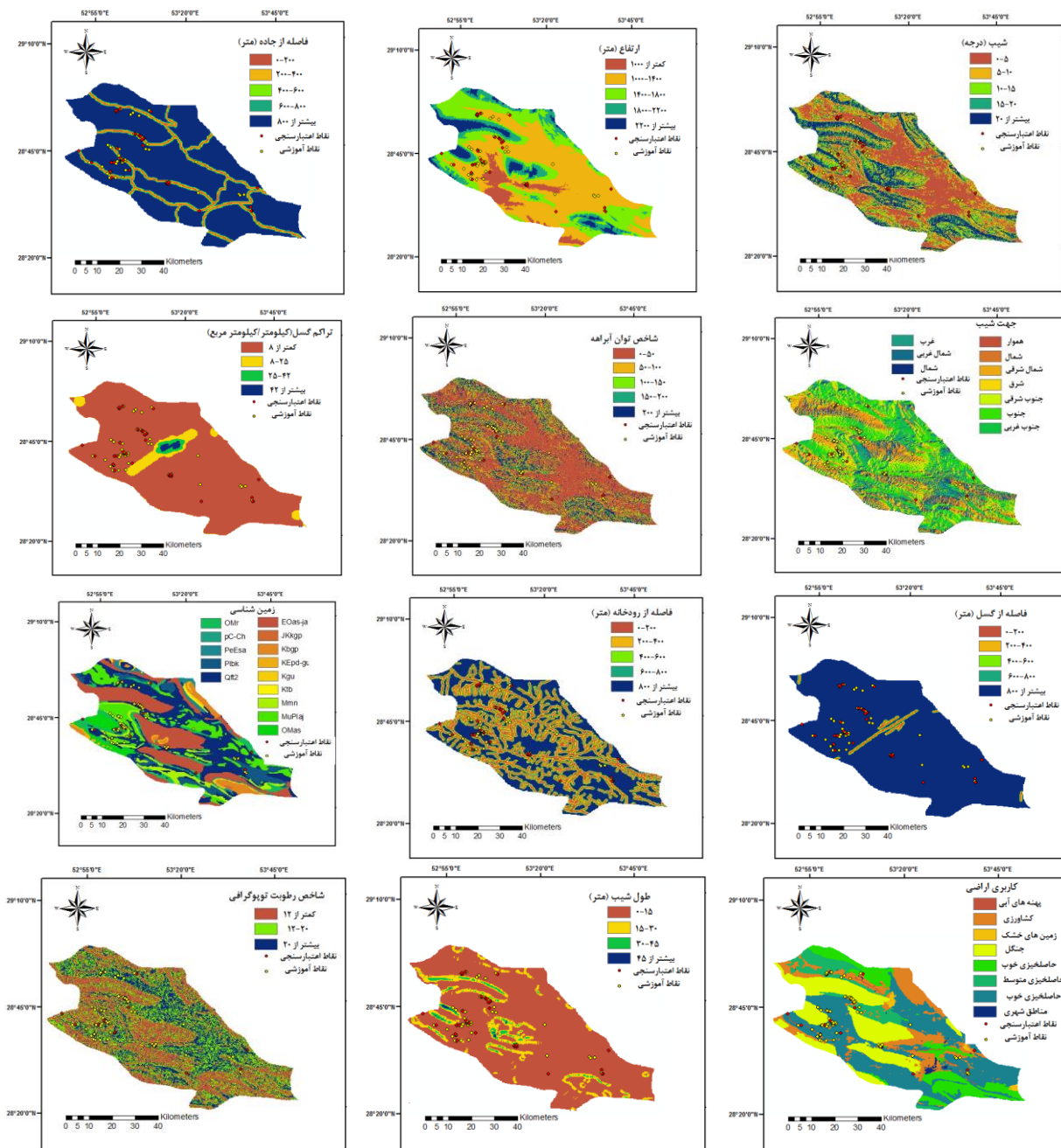
$$TWI = \ln \left( \frac{B_s}{\tan \alpha} \right) \quad (3)$$

که در آن:  $LS$  عامل طول شیب،  $SPI$  شاخص توان آبراهه،  $TWI$  شاخص رطوبت توپوگرافی،  $B_s$  مساحت حوضه آبخیز و  $\alpha$  گرادیان شیب برحسب درجه است.

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی معیارهای آب زیرزمینی

لایه‌های استفاده شده در این تحقیق، درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، طول شیب، شاخص توان آبراهه (SPI)، شاخص توپوگرافی رطوبت (TWI)، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، تراکم گسل، زمین‌شناسی و کاربری اراضی است که با توجه به سابقه پژوهش صورت گرفته در ایران و جهان [۱۹-۲۲] به‌عنوان عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی از روی نقشه‌های پایه موجود با استفاده از الحاقیه‌های مختلف در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی رقوم و تهیه شد. ابتدا مدل ارتفاعی رقوم با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از ماهواره ASTER تهیه شد و لایه‌های درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه از آن در نرم‌افزار ArcGIS 10 استخراج شد. لایه اطلاعاتی کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان فارس



شکل ۲. لایه‌های اطلاعاتی تأثیرگذار بر آب زیرزمینی

مدل نسبت فراوانی

مدل نسبت فراوانی به‌عنوان یک مدل آماری دو متغیره می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ساده مکانی برای محاسبه رابطه احتمالی بین متغیرهای مستقل و وابسته استفاده شود که شامل چندین نقشه طبقه‌بندی شده است [۵]. این روش برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی توسط Ozdemir استفاده شده است [۲۰]. در واقع نسبت فراوانی احتمال وقوع پدیده مطالعه‌شده در حضور یک ویژگی خاص است.

رویکرد نسبت فراوانی براساس رابطه مشاهده‌شده بین توزیع محل‌های چشمه‌های آب زیرزمینی و معیارهای وابسته به آب زیرزمینی است. نسبت فراوانی هر طبقه از هر معیار طبق معادله ۴ محاسبه می‌شود.

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \tag{۴}$$

در این معادله A تعداد پیکسل‌های دارای چشمه برای هر معیار، B تعداد کل چشمه‌ها در منطقه مطالعه‌شده، C

بی‌نظمی، بی‌ثباتی و شک‌های موجود در یک سیستم استفاده می‌شود [۲۸]. در آنتروپی، متغیرهایی با بیشترین تأثیر در وقوع یک رخداد، تعیین و مشخص می‌شوند. به‌منظور پهنه‌بندی و ترسیم نقشه با استفاده از مدل آنتروپی از رابطه‌های ۶ تا ۱۰ استفاده شد [۲۹ و ۳۰].

$$E_{ij} = \frac{FR}{\sum_{j=1}^{M_j} FR} \quad (6)$$

$$H_j = -\sum_{i=1}^{S_j} (E_{ij}) \log_r (E_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$H_{jmax} = \log_r M_j \quad (8)$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}} \quad I = (0, 1), j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$W_j = I_j * E_{ij} \quad (10)$$

در این روابط FR نسبت فراوانی،  $E_{ij}$  احتمال تراکم،  $H_j$  و  $H_{jmax}$  مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی،  $I_j$  ضریب اطلاعات و  $M_j$  تعداد طبقه‌ها،  $W_j$  وزن نهایی هر معیار است. از مزایای روش آنتروپی در نظر گرفتن رابطه بین متغیرهای شرکت‌کننده در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی است. از معایب این روش بررسی نکردن وزن برای هر طبقه از معیارهای تأثیرگذار است.

### نتایج

#### نتایج روش نسبت فراوانی

نتایج رابطه مکانی بین وقوع چشمه و عمل‌های مؤثر با استفاده از روش نسبت فراوانی پیاده‌سازی شد و نتایج در ستون پنجم جدول ۱ نشان داده شده است. نسبت مناطقی که در آن چشمه‌های زیرزمینی اتفاق افتاده به کل منطقه مد نظر رابطه‌ای مکانی است که مقدار یک نشان‌دهنده یک مقدار میانگین است. اگر مقادیر بزرگ‌تر از یک باشد، یک همبستگی زیاد و مقادیر کمتر از یک، نشان‌دهنده همبستگی کم مقادیر است [۵]. آنالیزهایی از نسبت فراوانی بین وقوع چشمه و درجه شیب نشان می‌دهد بیشترین مقدار مربوط به طبقه شیب بین ۵- ۱۰ درجه (۲/۰۳) است. طبق رابطه‌ای که بین وقوع چشمه و جهت شیب وجود دارد، بیشتر چشمه‌ها در مناطق شمال قرار دارند که این امر نشان‌دهنده زیادبودن پتانسیل آب زیرزمینی در جهت یادشده است. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده، برای معیار ارتفاع بیشترین مقدار نسبت

تعداد پیکسل‌های در هر طبقه از هر معیار و D تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه مطالعه‌شده است و FR نسبت فراوانی از یک طبقه برای هر معیار است. اگر چه روش نسبت فراوانی از مفاهیم ساده و قابل فهم استفاده می‌کند و همچنین قادر به انجام آنالیزهای آماری دومتغیره و طبقه‌های هر معیار بر وجود چشمه را بررسی می‌کند، ضعف روش یادشده در این است که اغلب رابطه بین متغیرها در آن نادیده گرفته می‌شود [۲۱].

#### مدل شاخص آماری

روش شاخص آماری یک روش آماری دومتغیره است که توسط Westen برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش ارائه شد [۲۵]. یک وزن مشخص برای هر طبقه از هر معیار به‌صورت لگاریتم طبیعی از تراکم چشمه در آن طبقه تقسیم بر تراکم چشمه‌ها در کل نقشه به‌دست می‌آید [۲۵ و ۲۶]. این مدل به‌سادگی می‌گوید که هر طبقه از هر معیار تا چه حدی نشانه‌ای از حضور پدیده چشمه است. این روش به‌صورت معادله ۵ محاسبه می‌شود.

$$W_{ij} = \ln \left( \frac{E_{ij}}{E} \right) = \ln \left( \frac{\frac{L_{ij}}{L_t}}{\frac{P_{ij}}{P_t}} \right) \quad (5)$$

که در این معادله w وزن داده‌شده به هر طبقه i از معیار j است،  $E_{ij}$  تراکم چشمه در طبقه i از معیار j است، E تراکم چشمه‌ها در کل نقشه است.  $L_{ij}$  تعداد چشمه در هر طبقه i از معیار j،  $P_{ij}$  تعداد پیکسل‌های طبقه i از پارامتر j،  $L_t$  تعداد چشمه در کل نقشه و  $P_t$  تعداد پیکسل‌های کل نقشه است. روش شاخص آماری نیز مانند روش نسبت فراوانی رابطه بین متغیرها را نادیده می‌گیرد و از معایب این روش به شمار می‌رود.

#### مدل آنتروپی

در اصل اسفان بولتزن که نخستین گام برای توسعه تئوری آنتروپی بود، رابطه‌ای یک‌به‌یک بین مقدار آنتروپی سیستم و درجه آشفتگی وجود دارد و به‌طور معمول برای بیان وضعیت ترمودینامیکی سیستم استفاده می‌شود [۲۲]. تئوری آنتروپی را نخستین بار شانون به‌صورت کمی بیان کرد [۲۷]. آنتروپی یکی از رویکردهای مدیریتی است که به‌منظور برخورد با

مقدار نسبت فراوانی (۲/۳۸) است و برای فاصله از جاده و گسل به ترتیب بیشترین وقوع چشمه مربوط به طبقه‌های بین ۰-۲۰۰ و بیشتر از ۸۰۰ با نسبت فراوانی ۴/۱۷ و ۱/۰۲۹ است. بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به تراکم گسل در طبقه کمتر از ۸ کیلومترمربع با مقدار ۱/۰۷ است. بیشترین مقدار مربوط به معیارهای زمین‌شناسی و کاربری اراضی به ترتیب مربوط به طبقه‌های گروه ۱۴ (Omr) و پهنه‌های آب با مقادیر ۲/۲۴ و ۳/۰۳ است. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش نسبت فراوانی در شکل ۳ نشان داده شده است.

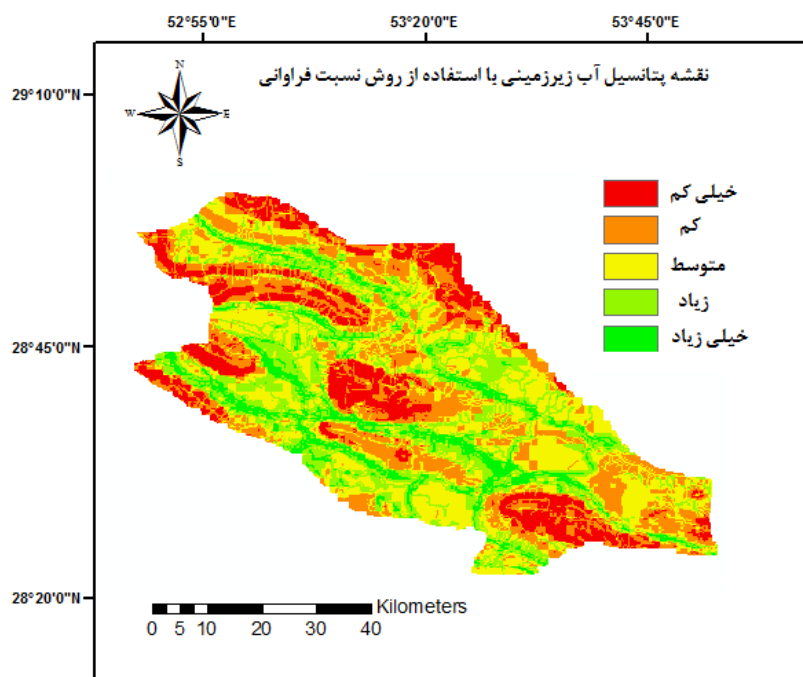
فراوانی (۲/۳۸) در ارتفاع ۱۰۰۰-۱۴۰۰ متر است که دلیل این امر احتمالاً کم بودن تراکم زهکشی در این طبقه و در نتیجه نفوذ بیشتر و امکان ورود آب زیرزمینی در درز و شکافها به سطح در این طبقه ارتفاعی است. در شاخص توپوگرافی رطوبت (TWI) طبقه ۱۲-۲۰ دارای بیشترین مقدار (۱/۰۰۸) و در شاخص توان آبراهه (SPI) طبقه بیشتر از ۲۰۰ متر دارای بیشترین مقدار نسبت فراوانی (۳/۲۲) است. در زمینه طول شیب بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به طبقه ۰-۱۵ با مقدار نسبت فراوانی (۱/۱۲) است. در زمینه وقوع چشمه و فاصله از رودخانه، بیشترین وقوع چشمه مربوط به طبقه ۰-۲۰۰ متر با

جدول ۱. رابطه مکانی بین هر معیار مؤثر و محل چشمه‌ها با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی

معیار	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد چشمه	نسبت فراوانی (FR)	شاخص آماری (WI)	$E_{ij}$	$H_j$	$H_{jmax}$	$I_j$	$W_j$
فاصله از رودخانه	۰-۲۰۰	۷۴۴۳	۳۲	۲/۳۸	۰/۸۷	۰/۴۱				
	۲۰۰-۴۰۰	۹۳۱۳	۱۲	۰/۷۲	-۰/۳۲	۰/۱۲۶				
	۴۰۰-۶۰۰	۳۲۴۷	۷	۱/۱۹	۰/۱۸	۰/۲	۲/۰۹۱	۲/۳۲	۰/۰۹۸	۰/۱۱
	بیشتر از ۸۰۰	۱۶۹۷۹	۱۶	۰/۵۳	-۰/۶۳	۰/۰۹۳				
فاصله از جاده	۰-۲۰۰	۱۶۲۱	۱۲	۴/۱۷	۱/۴۳	۰/۳۳				
	۲۰۰-۴۰۰	۲۲۳۹	۹	۲/۲۷	۰/۸۲	۰/۱۸				
	۴۰۰-۶۰۰	۸۸۶	۵	۳/۱۵	۱/۱۵	۰/۲۵	۲/۱۳۴	۲/۳۲	۰/۰۸	۰/۲
	بیشتر از ۸۰۰	۳۴۳۳۵	۳۸	۰/۶۳	-۰/۴۶	۰/۰۵				
فاصله از گسل	۰-۲۰۰	۳۳۲	۰	۰	۰	۰				
	۲۰۰-۴۰۰	۴۱۹	۰	۰	۰	۰				
	۴۰۰-۶۰۰	۲۴۷	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۳۲	۱	۰/۲
	بیشتر از ۸۰۰	۱۷۷	۰	۰	۰	۰				
شیب	۰-۵	۲۸۲۳۸	۴۵	۰/۹	-۰/۱	۰/۲۷				
	۵-۱۰	۷۱۶۳	۲۶	۲/۰۳	۰/۷۱	۰/۶۲				
	۱۰-۱۵	۳۳۹۰	۲	۰/۳۳	-۱/۰۹	۰/۱	۱/۲۷	۲/۳۲	۰/۴۵	۰/۲۹
	بیشتر از ۲۰	۱۸۸۹	۰	۰	۰	۰				
ارتفاع	کمتر از ۱۰۰۰	۲۸۲۸	۱۲	۲/۳۸	۰/۸۷	۰/۵۱				
	۱۰۰۰-۱۴۰۰	۱۴۹۴۶	۴۳	۱/۶۱	۰/۴۸	۰/۳۴				
	۱۴۰۰-۱۸۰۰	۱۵۴۴۲	۱۸	۰/۶۶	-۰/۴۱	۰/۱۴	۱/۴۲	۲/۳۲	۰/۳۸۷	۰/۳۵۹
	بیشتر از ۲۲۰۰	۶۲۹۶	۰	۰	۰	۰				
تراکم گسل	کمتر از ۸	۳۸۱۶۱	۷۳	۱/۰۷	۰/۰۶۹	۱				
	۸-۲۵	۲۰۴۰	۰	۰	۰	۰				
	بیشتر از ۲۵	۴۵۷	۰	۰	۰	۰				
بیشتر از ۴۲	۲۴۶	۰	۰	۰	۰					

ادامه جدول ۱. رابطه مکانی بین هر معیار مؤثر و محل چشمه‌ها با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی

معیار	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد چشمه	نسبت فراوانی (FR)	شاخص آماری (WI)	$E_{ij}$	$H_j$	$H_{jmax}$	$I_j$	$W_j$
شاخص توان آبراهه	۵۰-۰	۴۰۰۸۲	۷۲	۱/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۲۳				
	۱۰۰-۵۰	۷۴۲	۰	۰	۰	۰	۰/۷۸۸	۲/۳۲	۰/۶۶	۰/۵۶
	۱۵۰-۱۰۰	۲۱۳	۰	۰	۰	۰				
	۲۰۰-۱۵۰	۱۷۵	۰	۰	۰	۰				
TWI	بیشتر از ۲۰۰	۱۷۵	۱	۳/۲۲	۱/۱۷	۰/۷۶				
	کمتر از ۱۲	۲۶۸	۰	۰	۰	۰				
جهت شیب	۲۰-۱۲	۳۲۵۴۵	۵۸	۱/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۵	۱/۰۰۴۳	۱/۵۸۵	۰/۳۶۶	۰/۲۴۳
	بیشتر از ۲۰	۸۴۸۸	۱۵	۰/۹۹	-۰/۰۰۱۷۵	۰/۴۹				
طول شیب	هموار	۴۰۲۸	۱۵	۲/۰۱	۰/۷	۰/۲۳				
	شمال	۵۹۶۰	۱۶	۱/۵	۰/۴۱	۰/۱۷				
	شمال شرقی	۲۹۳۵	۹	۱/۷۳	۰/۵۵	۰/۱۹				
	شرق	۳۴۵۴	۶	۰/۹۸	-۰/۰۱۷	۰/۱۱				
	جنوب شرقی	۸۷۶۱	۱۱	۰/۷۱	-۰/۳۴	۰/۰۸۱	۲/۸۴	۳/۱۷	۰/۱	۰/۰۹۶
	جنوب	۸۱۳۵	۱۱	۰/۷۷	-۰/۲۶	۰/۰۸۸				
	جنوب غربی	۳۴۲۸	۳	۰/۴۹	-۰/۷	۰/۰۵۶				
	غرب	۲۳۷۸	۱	۰/۳۴	-۱/۴	۰/۰۲۷				
کاربری اراضی	شمال غربی	۲۲۲۲	۱	۰/۲۵	-۱/۳۶	۰/۰۲۸				
	۱۵-۰	۳۵۷۷۸	۷۱	۱/۱۲	۰/۱۱۵	۰/۸۱				
	۳۰-۱۵	۴۴۶۸	۲	۰/۲۵	-۱/۳۷	۰/۱۸	۰/۶۹۲	۲	۰/۶۵۵	۰/۲۲۴
زمین‌شناسی	۴۵-۳۰	۹۹۰	۰	۰	۰	۰				
	بیشتر از ۴۵	۶۵	۰	۰	۰	۰				
	آب	۱۸۵	۱	۳/۰۳	۱/۱۱	۰/۳۴				
	کشاورزی	۴۴۷۳	۱۴	۲/۲۲	۰/۸	۰/۲۵				
	شهری	۳۲۰	۰	۰	۰	۰				
	زمین‌های خشک	۲۳۰	۰	۰	۰	۰				
	جنگل	۱۲۱۸۹	۵	۰/۶۵	-۲/۵۳	۰/۰۷۲	۲/۲۵۷	۳/۵۸۵	۰/۳۷	۰/۲۷
زمین‌شناسی	حاصل خیزی خوب	۲۱۰۰	۰	۰	۰	۰				
	حاصل خیزی متوسط	۳۶۱۳	۸	۱/۲۴	۰/۲۲	۰/۱۴				
	حاصل خیزی ضعیف	۱۳۳۷۱	۴۵	۱/۶۴	۰/۵	۰/۱۸				
	گروه ۱	۱۲۱۶۶	۲۵	۱/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶				
	گروه ۲	۱۳۹۲	۱	۰/۴۱	-۰/۸۹	۰/۰۵۷				
	گروه ۳	۱۵۳۱	۰	۰	۰	۰				
	گروه ۴	۲۹۶۲	۳	۰/۵۷	-۰/۵۵	۰/۰۷۹				
	گروه ۵	۵۵	۰	۰	۰	۰				
	گروه ۶	۵۴۶۱	۱۱	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۵				
	گروه ۷	۴۸۰	۰	۰	۰	۰				
	گروه ۸	۱۰۰۶۵	۱۶	۰/۹	-۰/۱	۰/۱۲	۲/۵۸۹	۳/۸۷۰۴	۰/۳۲	۰/۱۶
	گروه ۹	۱۶۰۰	۰	۰	۰	۰				
	گروه ۱۰	۵۰	۰	۰	۰	۰				
	گروه ۱۱	۳۷۰	۰	۰	۰	۰				
گروه ۱۲	۲۲۶۰	۳	۰/۷۵	-۰/۲۸	۰/۱۰۴					
گروه ۱۳	۹۲۲	۰	۰	۰	۰					
گروه ۱۴	۳۵۰۴	۱۴	۲/۲۴	۰/۸۱	۰/۳۱					



شکل ۳. نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمده از روش نسبت فراواتی

۰/۱۱۵ و ۰/۰۰۸ است. بیشترین مقدار مربوط به معیارهای زمین شناسی و کاربری اراضی به ترتیب مربوط به طبقه های گروه ۱۴ (Omr) و پهنه های آب با مقادیر ۰/۸۱ و ۱/۱۱ است. شکل ۴ (الف) نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش شاخص آماری نشان می دهد.

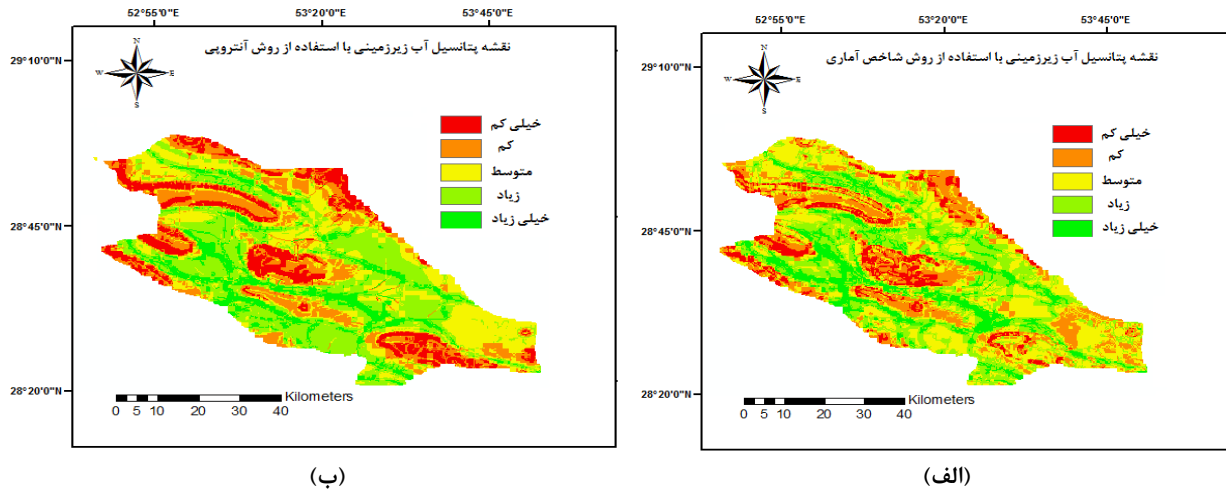
#### نتایج روش آنترپی

رابطه مکانی بین معیارهای مؤثر و محل وقوع چشمه با استفاده از روش آنترپی در ستون یازدهم ( $W_j$ ) جدول ۱ نشان داده شده است. بیشترین وزن را معیار شاخص توان آبراه با مقدار ۰/۵۶ به خود اختصاص داده است. برای معیارهای فاصله از رودخانه، فاصله از جاده و فاصله از گسل وزن های به دست آمده از این روش به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۲ و ۰/۲ است. در زمینه معیارهای درجه شیب، جهت شیب و طول شیب مقادیر به دست آمده به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۰۹۶ و ۰/۲۲۴ است. مقادیر مربوط به معیارهای ارتفاع، تراکم گسل، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی و زمین شناسی به ترتیب ۰/۳۵۹، ۰/۲۶، ۰/۲۴۳، ۰/۲۷ و ۰/۱۶ است. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش آنترپی در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است.

#### نتایج روش شاخص آماری

رابطه مکانی بین معیارهای مؤثر و محل وقوع چشمه با استفاده از روش شاخص آماری در ستون ششم جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر منفی نشان دهنده تأثیر کم طبقه طبقه بندی شده و مقادیر مثبت نشان دهنده تأثیر بیشتر طبقه های مربوط به معیار مد نظر است. در زمینه معیار فاصله از رودخانه بیشترین مقدار مربوط به طبقه ۰-۲۰۰ متر با مقدار ۰/۸۷ است. در معیار فاصله از جاده بیشترین مقدار (۱/۴۳) مربوط به طبقه ۰-۲۰۰ متر است. درباره فاصله از گسل بیشترین مقدار (۰/۲۹) مربوط به طبقه فواصل بیشتر از ۸۰۰ متر است و بقیه طبقه ها مقادیر صفر دارند. بیشترین مقدار مربوط به معیار شیب در طبقه ۵-۱۰ درجه با مقدار ۰/۷۱ است. در زمینه معیار جهت شیب بیشترین وقوع چشمه در جهت شمال شرقی با مقدار ۰/۵۵ است. بیشترین مقدار به دست آمده از شاخص آماری برای معیار ارتفاع مربوط به طبقه کمتر از ۱۰۰۰ متر با مقدار ۰/۸۷ است. برای شاخص های تراکم گسل، شاخص توان آبراه، طول شیب و شاخص رطوبت توپوگرافی بیشترین مقادیر به ترتیب ۰/۰۶۹، ۱/۰۱۶،





شکل ۴. نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی (الف) روش شاخص آماری؛ (ب) روش آنتروپی

$$Y = \left[ \frac{TP}{TP + FN} \right] \quad (11)$$

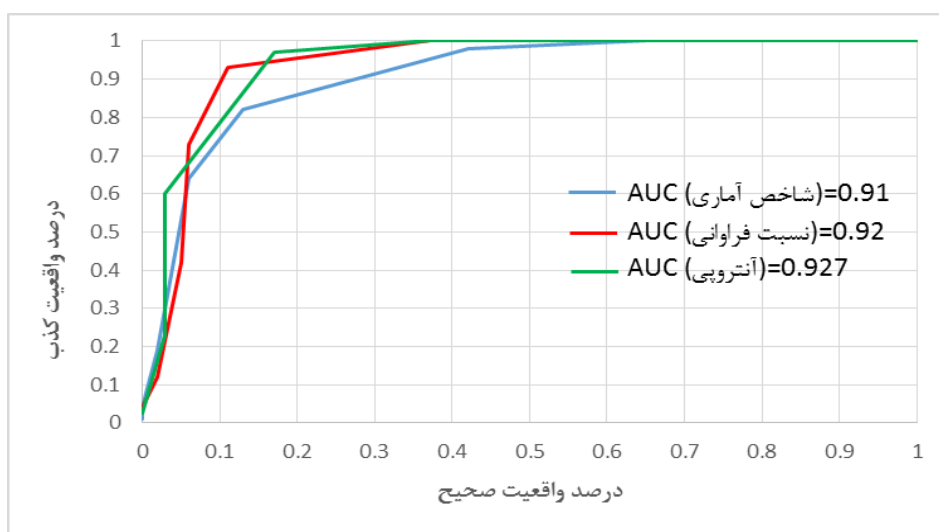
سطح زیر منحنی ROC که AUC نامیده می‌شود، بیان‌کننده مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداد (وقوع چشمه) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع چشمه) آن است. ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵-۱ متغیر است. چنانچه مدلی نتواند رخداد وقوع چشمه را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین بزند مقدار AUC آن ۰/۵ است و زمانی که منحنی ROC، سطح زیر منحنی برابر یک داشته باشد بیان‌کننده بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است. همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به‌صورت زیر است 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 [۳۳]. دقت به‌دست‌آمده مربوط به مدل‌های آنتروپی، نسبت فراوانی و شاخص آماری به‌ترتیب برابر ۹۲/۷ درصد، ۹۲ درصد و ۹۱ درصد است که نشان‌دهنده دقت عالی این سه روش است. علت زیادبودن دقت در روش آنتروپی نسبت به دو روش دیگر، استفاده از مقادیر روش نسبت فراوانی و ترکیبی‌بودن این روش نسبت به روش دیگر است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تحقیقات ذبیحی و همکارانش [۲۳] و نقیبه و همکارانش [۲۲] مطابقت دارد. نمودار ROC مربوط به سه روش در شکل ۵ نشان داده شده است.

### ارزیابی نتایج

پس از تهیه نقشه نهایی به‌دست‌آمده از سه روش، نقشه نهایی به پنج کلاس خیلی کم تا خیلی زیاد تقسیم می‌شود. برای ارزیابی نقشه‌های تهیه‌شده و دقت آنها نمی‌توان از چشمه‌هایی استفاده کرد که در پهنه‌بندی استفاده شده‌اند، زیرا با به‌کارگیری این چشمه‌ها در ارزیابی، دقت به‌دست‌آمده به‌درستی دقت مدل استفاده‌شده را نشان نمی‌دهد و باید کارایی مدل استفاده‌شده با داده‌هایی امتحان شود که برای مدل‌سازی به‌کار گرفته نشده است [۳۱]. برای رفع این مشکل، تعدادی از محل وقوع چشمه در منطقه مطالعه‌شده برای مدل‌سازی و بخشی از آن نیز برای ارزیابی مدل یادشده (به‌ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد) استفاده شد [۳۲]. آن‌گاه با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC<sup>۱</sup>) صحت نقشه‌های تهیه‌شده تأیید شد. منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از خطای برش‌هاست. شاخص عملکرد نسبی، منحنی است که مؤلفه قائم و افقی آن به‌ترتیب از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شوند که از ماتریس مقایسه با تعریف حد آستانه بین صفر و یک به دست می‌آیند. مقادیر مربوط به درصد واقعیت صحیح<sup>۲</sup> و درصد واقعیت کذب<sup>۳</sup> نمودار طبق روابط زیر محاسبه می‌شود [۳۱].

$$X = 1 - \left[ \frac{TN}{TN + FP} \right] \quad (10)$$

1. Relative Operating Characteristic
2. True Positive
3. False Positive



شکل ۵. نمودار ROC مربوط به سه روش نسبت فراوانی، آنتروپی و شاخص آماری

### نتیجه گیری

با توجه به هزینه‌بر بودن آزمایش‌های اکتشافی منابع آب زیرزمینی، تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های نوین با هدف محافظت، مدیریت و بهره‌برداری صحیح از منابع آب امری حائز اهمیت است. هدف از تحقیق حاضر، تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های آماری نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی در استان فارس، شهرستان جهرم است. بدین منظور پس از تهیه نقشه‌های پراکنش چشمه‌های منطقه، لایه‌های اطلاعاتی درجه شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، طبقه ارتفاعی، تراکم گسل، شاخص توان آبراهه، طول شیب و شاخص رطوبت توپوگرافی به‌عنوان عوامل مؤثر بر چشمه آب زیرزمینی شناسایی شد. اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از مدل آنتروپی نشان داد لایه‌های شاخص توان آبراهه، ارتفاع و کاربری اراضی بیشترین تأثیر؛ و عوامل جهت شیب، زمین‌شناسی و طول شیب کمترین تأثیر را بر وقوع چشمه در منطقه مطالعه شده داشته‌اند. برای ارزیابی مدل‌های مد نظر از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد. دقت‌های به‌دست‌آمده از روش‌های آنتروپی، نسبت فراوانی و شاخص آماری به ترتیب ۹۲/۷ درصد، ۹۲ درصد و ۹۱ درصد است. ارزیابی مدل‌های مد نظر نشان‌دهنده دقت زیاد، برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از سه روش نسبت

فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی است. دلیل زیادتربودن دقت در روش آنتروپی نسبت به دو روش دیگر، استفاده از نتایج روش نسبت فراوانی در این مدل و ترکیبی بودن آن است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه روش شاخص آماری برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی دقت زیادی به خود اختصاص داده، ولی مدل‌های دیگر دقت بیشتری نسبت به این مدل در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی دارند. بنابراین، به‌عنوان پیشنهاد می‌توان بر نتایج مدل آنتروپی با توجه به دقت قابل قبول آن برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی تأکید داشت. حال از آنجا که در شهرستان جهرم مطالعه‌ای در زمینه تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی صورت نگرفته است، این مطالعه می‌تواند بیان‌کننده وضعیت پتانسیل آب زیرزمینی در شهرستان جهرم باشد. همچنین می‌توان گفت که نقشه‌های یادشده، می‌تواند تأثیر بسزایی در تصمیم‌گیری‌های آتی، مدیریت آب‌های زیرزمینی و بهره‌برداری از آنها در منطقه مطالعه شده داشته باشد.

### منابع

- [1]. Todd DK, Mays LW. Groundwater hydrology. 1980.
- [2]. Arkoprovo B, Adarsa J, Prakash SS. 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. 2012; 2277:2502.

- [3]. Shahid S, Nath S, Roy J. Groundwater potential modelling in a soft rock area using a GIS. *International Journal of Remote Sensing*. 2000; 21(9):1919-24.
- [4]. Greenbaum D. Structural influences on the occurrence of groundwater in SE Zimbabwe. Geological Society, London, Special Publications. 1992; 66(1):77-85.
- [5]. Oh H-J, Kim Y-S, Choi J-K, Park E, Lee S. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*. 2011; 399(3):158-72.
- [6]. Mukherjee S. Targeting saline aquifer by remote sensing and geophysical methods in a part of Hamirpur-Kanpur, India. *Hydrogeol J*. 1996; 19:53-64.
- [7]. Ganapuram S, Kumar GV, Krishna IM, Kahya E, Demirel MC. Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Advances in Engineering Software*. 2009; 40(7):506-18.
- [8]. Pradhan B. Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Open Geosciences*. 2009; 1(1):120-9.
- [9]. Prasad R, Mondal N, Banerjee P, Nandakumar M, Singh V. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental geology*. 2008; 55(3):467-75.
- [10]. Tweed SO, Leblanc M, Webb JA, Lubczynski MW. Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. *Hydrogeology Journal*. 2007; 15(1):75-96.
- [11]. Nobre R, Rotunno Filho O, Mansur W, Nobre M, Cosenza C. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2007; 94(3):277-92.
- [12]. Jha MK, Chowdhury A, Chowdary V, Peiffer S. Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. *Water Resources Management*. 2007; 21(2):427-67.
- [13]. Ghayoumian J, Saravi MM, Feiznia S, Nouri B, Malekian A. Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2007; 30(2):364-74.
- [14]. Masetti M, Poli S, Sterlacchini S. The use of the weights-of-evidence modeling technique to estimate the vulnerability of groundwater to nitrate contamination. *Natural Resources Research*. 2007; 16(2):109-19.
- [15]. Arthur JD, Wood HAR, Baker AE, Cichon JR, Raines GL. Development and implementation of a Bayesian-based aquifer vulnerability assessment in Florida. *Natural Resources Research*. 2007; 16(2):93-107.
- [16]. Zhang Z, Cheng Q, editors. GIS Spatial statistical analysis of groundwater in GTA, Canada. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002 IGARSS'02 2002 IEEE International*; 2002: IEEE.
- [17]. Chenini I, Mammou AB, El May M. Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resources Management*. 2010; 24(5):921-39.
- [18]. Moghaddam DD, Rezaei M, Pourghasemi H, Pourtaghie Z, Pradhan B. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2015; 8(2):913-29.
- [19]. Manap MA, Nampak H, Pradhan B, Lee S, Sulaiman WNA, Ramli MF. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*. 2014; 7(2):711-24.
- [20]. Ozdemir A. 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*. 2011; 411(3):290-308.
- [21]. Pourtaghi ZS, Pourghasemi HR. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*. 2014; 22(3):643-62.
- [22]. Naghibi SA, Pourghasemi HR, Pourtaghi ZS, Rezaei A. Groundwater spring potential mapping using Shannon's entropy and Random Forest models in the Bojnord watershed, Iran. *Earth Science Informatics*. 2015; 8(1):171-86.
- [23]. Zabihi M, Pourghasemi HR, Behzadfar M. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *ecohydrology Journal*. 2015; 2(2):221-232. (Persian).

- [24]. Moore I, Burch G. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. *Water Resources Research*. 1986;22(8):1350-60.
- [25]. Van Westen C. Statistical landslide hazard analysis. *ILWIS*. 1997;2:73-84.
- [26]. Rautela P, Lakhera RC. Landslide risk analysis between Giri and Tons rivers in Himachal Himalaya (India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2000;2(3):153-60.
- [27]. Shannon CE. A mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. 2001;5(1):3-55.
- [28]. Pourghasemi HR, Mohammady M, Pradhan B. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*. 2012; 97:71-84.
- [29]. Bednarik M, Magulová B, Matys M, Marschalko M. Landslide susceptibility assessment of the Kral'ovany–Liptovský Mikuláš railway case study. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2010; 35(3):162-71.
- [30]. Constantin M, Bednarik M, Jurchescu MC, Vlaicu M. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental earth sciences*. 2011;63(2):397-406.
- [31]. Komac M. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology*. 2006;74(1):17-28.
- [32]. Constantin M, Bednarik M, Jurchescu MC, Vlaicu M. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental earth sciences*. 2011;63(2):397-406.
- [33]. Zhu C, Wang X, editors. Landslide susceptibility mapping: a comparison of information and weights-of-evidence methods in Three Gorges Area. *Environmental Science and Information Application Technology, 2009 ESIAT 2009 International Conference on; 2009: IEEE*.