دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از مدل‌های شاخص آنتروپی و نایو بیز

وحید کریمی[۱]، محمدعلی قربانی[۲] و صابره دربندی[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، (نویسنده مسوول: vahid.karimi22@yahoo.com)
۲ و ۳- دانشیار و استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲
صفحه: ۲۷۳ تا ۲۸۶

چکیده

اگرچه منابع آب زیرزمینی، از دیرباز به‌عنوان یک گزینه مطمئن مورد استفاده انسان بوده است، اما برداشت بی‌رویه از آنها به‌خصوص در دشت اردبیل سبب افت کمی و کیفی این منابع شده است. یکی از راه‌کارهای مدیریتی منابع آب، شناسایی مناطق آبی با پتانسیل‌های مختلف و بهره‌برداری از آنها با توجه به ظرفیت آن‌ها می‌باشد. هدف از این مطالعه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت مذکور با استفاده از عوامل مؤثر در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، از طریق مدل عینی شاخص آنتروپی و همچنین مدل عینی یادگیری ماشینی نایوبیز است. لذا برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه، از پارامترهای طبقات ارتفاعی، شیب زمین، بارش، فاصله از رودخانه، شاخص پوشش گیاهی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، عمق آب زیرزمینی و قابلیت انتقال آبخوان دشت مورد نظر استفاده گردید. به‌منظور عینیت بخشیدن هرچه بیشتر به مدل‌سازی، پارامترهای طیفی مورد استفاده، با استفاده از روش بهینه‌سازی جنکز کلاس‌بندی شدند. ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌ها با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم و معیار مساحت زیر منحنی صورت پذیرفت. معیار مساحت زیر منحنی برای مدل‌های شاخص آنتروپی و نایوبیز به‌ترتیب ۰/۷۲۸ و ۰/۸۲۱ محاسبه شد که نشانگر توانایی هر دو مدل در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل و برتری مدل نایوبیز نسبت به مدل شاخص آنتروپی می‌باشد. نتایج حاصل از پتانسیل‌یابی دقیق منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل می‌تواند در طرح‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از بهره‌کشی بیش از توان آن‌ها سازنده باشد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آب زیرزمینی، دشت اردبیل، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل شاخص آنتروپی، مدل نایو بیز

مقدمه

منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در تمامی نواحی اقلیمی جهان محسوب می‌شود (۲۶). این منابع در بسیاری از کشورهای واقع در نواحی خشک و نیمه‌خشک بیش از ۸۰ درصد منابع آبی مورد استفاده را تشکیل می‌دهند و از آنجا که منابع سطحی در بسیاری از مناطق کشور محدود می‌باشد، آب زیرزمینی به‌عنوان مناسب‌ترین منبع در دسترس جهت تأمین آب مورد نیاز به‌حساب می‌آید (۲۱). علی‌رغم اینکه آب‌های زیرزمینی کمتر از آب‌های سطحی در معرض خشک‌سالی و تغییر کیفیت هستند، اما آبخوان‌ها به‌دلیل افت تراز آبی، کاهش کیفیت ناشی از برداشت بی‌رویه، تأثیرپذیری از تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی و تغییر نظام بارش (۲۷) و رخداد خشکسالی‌های ممتد و متوالی، از چالش‌های مهم توسعه هستند. بنابراین، احیاء و بهره‌برداری بهینه‌ی متناسب با توان آبخوان‌ها یکی از شیوه‌های حل چالش ناشی از کمبود منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (۱۸).

کشور ایران دارای شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک است و منابع آب‌های زیرزمینی در کشور، در حدود ۷۷/۸ درصد مصارف شرب، صنعت و کشاورزی را تأمین می‌کنند (۳۰). دشت اردبیل نیز در شمال غربی ایران واقع است، دارای همواری نسبی و حاصلخیزی فراوانی بوده که آن‌را برای هرگونه فعالیت‌های کشاورزی مناسب ساخته است. اما کاهش منابع آب زیرزمینی به‌دلیل برداشت بی‌رویه از این منابع در سال‌های اخیر، نیازمند پتانسیل‌یابی و بهره‌برداری بهینه متناسب با توان منطقه را دارد.

عوامل متعددی در شکل‌گیری و حرکت آب‌های زیرزمینی دخیل هستند که شامل توپوگرافی، سنگ‌شناسی، ساختار زمین‌شناسی، عمق هوازدگی، تخلخل اولیه و ثانویه، شیب، الگوی زهکشی، شکل زمین، کاربری اراضی، پوشش زمین و اقلیم می‌باشند (۷). شناسایی و تعیین اهمیت هر یک از عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی منطقه مورد نظر امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. به‌منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)[۱] و سنجش از دور (RS)[۲] می‌تواند لایه‌های هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی را به‌طور مؤثر و کارآمد ترکیب و تجزیه و تحلیل کند (۲۲،۹). از مزایای این روش‌ها، می‌توان به قابلیت پردازش حجم وسیعی از اطلاعات مکانی، آسان، سریع و کم‌هزینه بودن مدل‌سازی و رقومی بودن اطلاعات به‌دست‌آمده اشاره کرد (۱۲).

در مدل‌سازی به روش سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، در روش‌های مبتنی بر ترکیب خطی وزنی، برای نشان دادن اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، وزنی به هریک از آنها داده می‌شود و روش های متعددی برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر در مدل‌سازی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته

1- Geographic Information System
2- Remote Sensing

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

ذهنی و عینی تقسیم‌بندی کرد (۱). روش‌های ذهنی بر پایه دانش و ترجیح و قضاوت شخص تصمیم‌گیرنده استوارند، در حالی‌که در روش‌های عینی از مدل‌های ریاضی برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر در مدل‌سازی استفاده می‌شود. محققان در مطالعات قبلی، برای تعیین نواحی پتانسیل آب‌های زیرزمینی، از روش‌های ذهنی مانند ترکیب خطی وزنی[1] (۲۸)، روش تجمع وزنی[2] (۱۶)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[3] (۵)، مدل مجموع وزنی[4] (۱۷) و ... استفاده کرده‌اند که این روش‌ها بیشتر متأثر از ذهنیت و ترجیح شخصی فرد تصمیم‌گیرنده بودند.

مدل شاخص آنتروپی[5] از روش‌های عینی مبتنی بر ترکیب خطی وزنی به‌شمار می‌رود، که در آن، براساس مقادیر آنتروپی، وزن‌هایی عینی به پارامترهای موثر در پتانسیل‌یابی تعیین می‌گردد (۲).

ذبیحی و همکاران (۳۰) نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت بجنورد را با استفاده از دو مدل شاخص آنتروپی و مدل جنگل تصادفی (RF)[6] تهیه کردند و برتری مدل شاخص آنتروپی را نسبت به مدل جنگل تصادفی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت مذکور نشان دادند.

نقیبی و همکاران (۱۴) به پتانسیل‌یابی منابع آب زیر زمینی حوضه آبخیز مغان با استفاده از دو مدل شاخص آنتروپی و مدل نسبت فراوانی (FR)[7] پرداختند. نتایج به‌دست آمده حاکی از برتری نسبی مدل شاخص آنتروپی نسبت به مدل نسبت فراوانی بود.

زندی و همکاران (۳۱) با توسعه مدل آماری و احتمالاتی رگرسیون لجستیک[8]، نقشه پتانسیل چشمه‌های حوزه آبخیز میرده استان کردستان را تهیه کردند و قابلیت بسیار خوب مدل مذکور در پتانسیل‌یابی چشمه‌های حوضه آبخیز مربوطه را با مقدار معیار مساحت زیر منحنی ۰/۹۰۵ نشان دادند.

در مدل‌سازی به روش سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشینی نیز وجود دارند که پتانسیل‌یابی در آنها براساس طبقه‌بندی دوگانه صورت می‌پذیرد، که مدل نایو بیز[9]، جزو این دسته به‌شمار می‌آید (۲۵). نقیبی و همکاران (۱۳) به پتانسیل‌یابی منابع آب زیر زمینی کاشمر در استان خراسان رضوی با استفاده از مدل‌های هوشمند نایو بیز، GAM، بگینگ[10] و آدابوست[11] پرداختند و قابلیت مدل‌های مذکور را در مدل‌سازی پتانسیل آب‌زیرزمینی، قابل قبول توصیف کردند.

لذا هدف از این تحقیق، استفاده از دو مدل عینی شاخص آنتروپی و نایو بیز در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل و ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از این دو مدل با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم و معیار مساحت زیر منحنی می باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های چاه‌های بهره‌برداری

منطقه مورد مطالعه دشت اردبیل با مساحت تقریبی ۱۱۹۵ کیلومترمربع در شمال‌غربی ایران واقع شده است. این دشت در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی واقع است و از نظر تقسیمات کشوری به استان اردبیل تعلق دارد. این دشت، مشرف بر ارتفاعات بخش غربی رشته‌کوه البرز و در امتداد دامنه شرقی سبلان قرار دارد و ارتفاع متوسط آن، حدود ۱۳۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد می‌باشد. رودخانه‌های قره‌سو، بالخلوچای و قوری‌چای از رودخانه‌های اصلی این دشت می‌باشند، به‌طوری که رودخانه‌های بالخلوچای و قوری‌چای در شمال دشت به رودخانه قره‌سو می‌پیوندند.

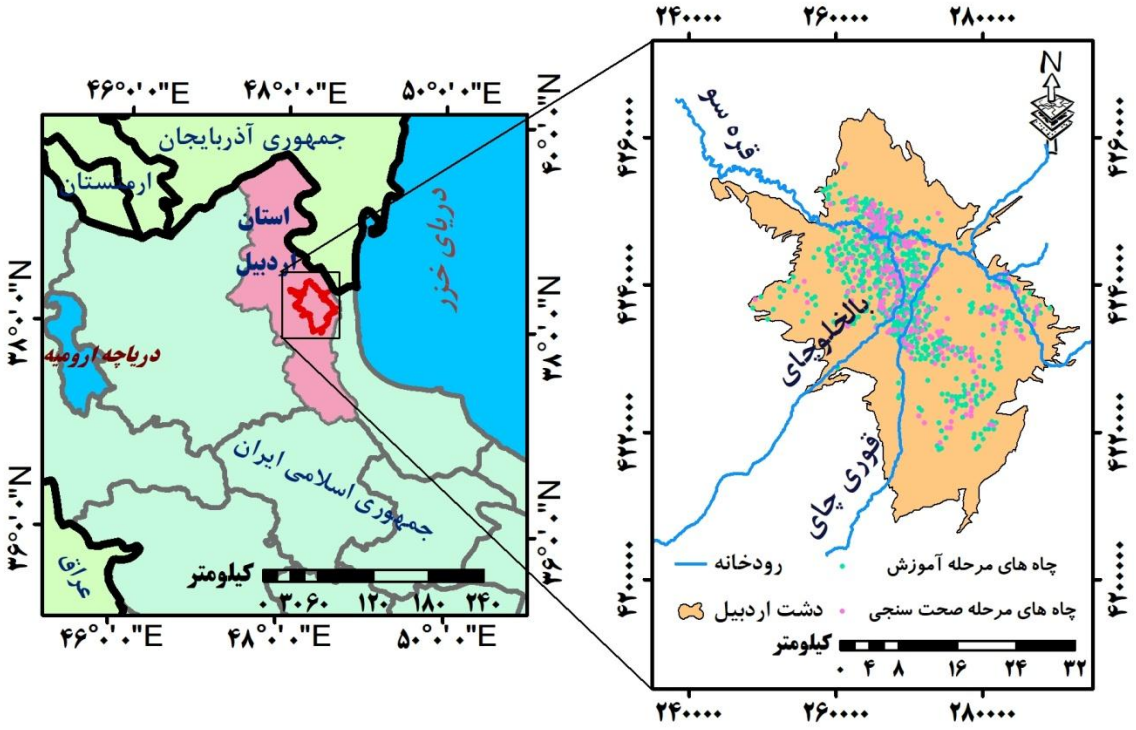
این دشت عمدتاً از رسوبات آبرفتی کوارترنری که از هوازدگی کوهستان‌ها و ارتفاعات اطراف دشت بوجود آمده‌اند، تشکیل شده است. این رسوبات به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: دسته اول، پادگانه‌های کهن نام دارند که در حاشیه شمالی دشت قرار دارند. دسته دوم، پادگانه‌های جوان نامیده می‌شوند که بخش عمده آبخوان را تشکیل می‌دهند. به‌طوری‌که پادگانه‌های قدیمی تغذیه آبخوان کمتری نسبت به پادگانه‌های جوان دارند (۱۱).

از لحاظ کاربری اراضی، در حدود ۴/۴ درصد دشت اردبیل، مسکونی بوده و اراضی آبی و اراضی دیم و مراتع به ترتیب ۴۸/۴ و ۴۶/۲ درصد مساحت دشت را شامل می‌شوند؛ همچنین، ۰/۸ درصد از مساحت دشت اردبیل، بایر بوده و پهنه‌های آبی درحدود ۰/۲ درصد سطح این دشت را پوشش می‌دهند (شکل ۳- ز).

متوسط بارش سالانه ایستگاه سینوپتیک اردبیل حدود ۳۰۴ میلیمتر می‌باشد. در این دشت، پرباران‌ترین ماه سال اردیبهشت ماه و کم‌باران‌ترین آن، ماه مرداد است. میانگین دمای سالانه ایستگاه سینوپتیک اردبیل ۹ درجه سانتیگراد بوده و یکی از نواحی سردسیر ایران است. به‌طوری‌که حداقل دمای ثبت شده در ایستگاه ۳۳/۸- درجه سانتی‌گراد و متوسط تعداد روزهای یخبندان ۱۳۰ روز در سال است (۱۱). شکل (۱) نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه را در استان اردبیل نشان می‌دهد.

1- Weighted Linear Combination (WLC)
2- Weighted Aggregation Method (WAM)
3- Analytical Hierarchy Process (AHP)
4- Weighted Sum Model (WSM)
5- Index of Entropy model (IE)
6- Random Forest
7- Frequency Ratio
8- Logistic Regression
9- Naïve Bayes model (NB)
10- Bagging
11- AdaBoost

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]



شکل ۱- موقعیت عمومی منطقه مورد مطالعه و چاه‌های مرحله آموزش و صحت‌سنجی
Figure 1. Location of the study area and training and testing wells

به‌منظور مدل‌سازی و ارزیابی نقشه پتانسیل منابع آب زیر زمینی دشت اردبیل، اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری پر آب دشت اردبیل از سازمان آب‌منطقه‌ای استان اردبیل تهیه شده است (جدول ۱).

در محدوده دشت اردبیل تعداد ۲۲۲۳ حلقه چاه نیمه‌عمیق، ۲۲۲ حلقه چاه عمیق، ۲۰ دهنه چشمه و ۱۷ رشته قنات وجود دارد که به مصارف کشاورزی و صنعت و شرب اختصاص دارند (۴).

جدول ۱- مشخصات چاه‌های بهره‌برداری دشت اردبیل

Table 1. Groundwater yield data of Ardabil Plain

مجموع تعداد چاه‌های بهره‌بردای دشت اردبیل	حداقل دبی چاه‌های بهره‌برداری (لیتر بر ثانیه)	میانگین دبی چاه‌های بهره‌برداری (لیتر بر ثانیه)	حداکثر دبی چاه‌های بهره‌برداری (لیتر بر ثانیه)	انحراف معیار دبی چاه‌های بهره‌برداری (لیتر بر ثانیه)
۲۴۴۵	صفر	۱۲/۳۲	۵۶/۳	۱۰/۷۷

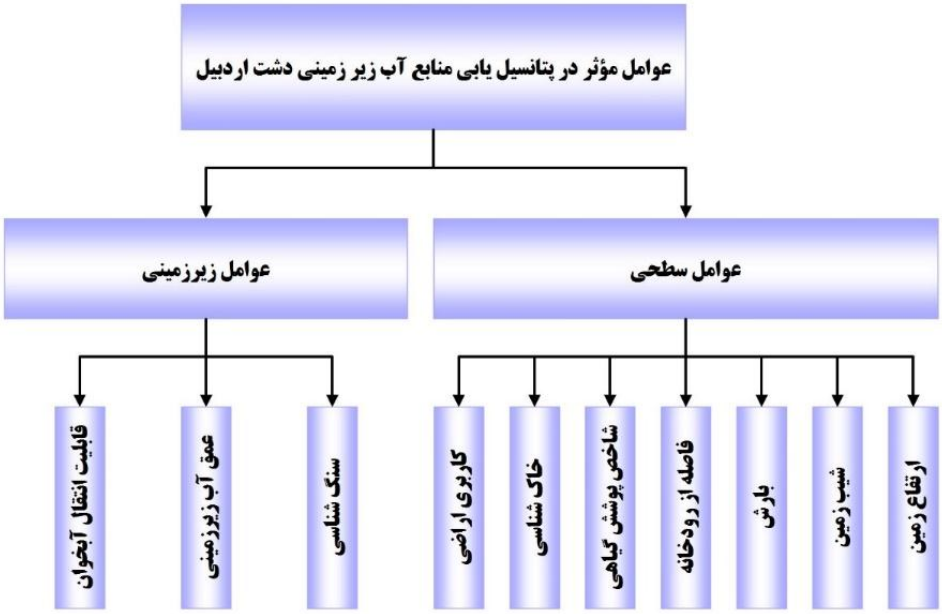
از بین چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌هایی که دبی بالاتری نسبت به میانگین دبی چاه‌های بهره‌برداری داشتند، یعنی ۸۴۱ چاه به‌عنوان چاه‌های پر آب انتخاب شدند. در گام بعدی، چاه‌های پر آب به‌صورت تصادفی به دو قسمت، داده‌های مرحله آموزش ۷۰٪ (۵۸۹ چاه) و داده‌های مرحله صحت‌سنجی ۳۰٪ (۲۵۲ چاه) تقسیم‌بندی شدند (شکل ۱).

شناسایی و تهیه عوامل موثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل

عوامل متعددی نظیر زمین‌شناسی، پستی و بلندی، نوع خاک، چگالی زهکشی، شیب زمین، پوشش اراضی، بارش در شکل‌گیری و حرکت آب‌های زیرزمینی مؤثر هستند. لذا انتخاب پارامترها عمدتاً به هدف مطالعه و همچنین به موجود بودن داده‌ها بستگی دارد. بنابراین، پارامترها در مطالعه‌های مشابه، متفاوت هستند. شایان ذکر است که انتخاب مناسب پارامترها به‌منظور پتانسیل‌یابی دقیق آب‌های زیرزمینی نقشی مهم و تعیین‌کننده دارد (۲۲،۱).

بر این اساس، پس از مطالعه تحقیقات انجام شده داخلی و خارجی در خصوص عوامل مؤثر در پتانسیل منابع آب زیرزمینی، از ده پارامتر طبقات ارتفاعی، شیب زمین، بارش، فاصله از رودخانه، شاخص پوشش گیاهی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، عمق آب زیرزمینی و قابلیت انتقال آبخوان به‌عنوان متغیرهای ورودی برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل استفاده شد که به دو گروه عمده عوامل سطحی و زیرزمینی تقسیم‌بندی شدند (شکل ۲).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]



شکل ۲- پارامترهای مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل
Figure 2. Groundwater occurrence factors of Ardabil Plain

عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی را می‌توان با توجه به مقادیرشان، به دو گروه طیفی و گسسته تقسیم‌بندی کرد. پارامترهای طیفی، دارای داده‌های پیوسته و طیفی هستند و مقادیر آن‌ها را می‌توان به گروه‌های متنوعی تقسیم‌بندی کرد ولی در مقابل، پارامترهای گسسته، دارای مقادیر گسسته‌ای هستند که مقادیر آن‌ها به گروه‌های مشخصی تقسیم‌بندی می‌شوند (۲۰).

از بین پارامترهای مورد استفاده در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، پارامترهای طبقات ارتفاعی، شیب زمین، بارش، فاصله از رودخانه، شاخص پوشش گیاهی، عمق آب زیرزمینی و قابلیت انتقال آبخوان جزء پارامترهای طیفی هستند. در مقابل، پارامترهای خاک‌شناسی، کاربری اراضی و سنگ‌شناسی جزء پارامترهای گسسته می‌باشند.

پارامترهای طبقات ارتفاعی و شیب زمین از تصویر GDEM-ASTER[1] با سلول‌های ۳۰ متری برای محدوده دشت اردبیل تهیه گردیدند (شکل‌های ۳- الف و ۳- ب). برای به‌دست آوردن نقشه بارش دشت اردبیل، از داده‌های آماری ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ تا سال آبی ۹۴-۱۳۹۳) مربوط به ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل استفاده شده است. نقشه رستری بارش از درون‌یابی میانگین پانزده‌ساله داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی مذکور به روش کریجینگ معمولی حاصل شده است (شکل ۳- ج). نقشه فاصله از رودخانه برای دشت اردبیل از طریق محاسبه فاصله از رودخانه‌های قره‌سو، بالخلوچای و قوری‌چای در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 تهیه شده است (شکل ۳- د). جهت تهیه نقشه‌ی شاخص پوشش گیاهی، تصویر ماهواره‌ای سنجنده OLI[2] ماهواره لندست ۸ به تاریخ ۲۰۱۵/۰۷/۲۵ میلادی تهیه شده و پس از تصحیح اتمسفری تصویر ماهواره‌ای در نرم‌افزار ENVI 5.3، شاخص پوشش گیاهی (*NDVI*)[3] از طریق رابطه (۱) محاسبه شده است (۱۰):

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \qquad (۱)$$

که در آن *NDVI* شاخص پوشش گیاهی (عددی بدون بعد بین ۱- و ۱+)، *NIR* و *R* به‌ترتیب بازتابندگی در باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز می‌باشند (شکل ۳- ه).

نقشه‌های خاک‌شناسی و زمین‌شناسی و کاربری اراضی دشت اردبیل از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اردبیل برای محدوده مطالعاتی اخذ گردید و کمی‌سازی پارامترهای خاک‌شناسی و زمین‌شناسی به‌ترتیب بر اساس تخلخل گونه‌های مختلف خاک و آب‌دهی ویژه هریک از واحدهای سنگ‌شناسی صورت پذیرفته است (شکل‌های ۳، ۴- الف و ۳- ز) (۲۶).

همچنین، برای به‌دست آوردن نقشه عمق آب‌زیرزمینی دشت اردبیل، از داده‌های آماری ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ تا سال آبی ۹۴-۱۳۹۳) مربوط به ۳۷ چاه مشاهده‌ای سازمان آب‌منطقه‌ای استان اردبیل استفاده شده است. نقشه‌ی رستری عمق آب زیرزمینی از درون‌یابی میانگین پانزده‌ساله داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای مذکور به روش کریجینگ معمولی حاصل شده است (شکل ۴- ب) و نیز با استفاده از داده‌های ۴۲ چاه حاصل از آزمایشات پمپاژ سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل و با به‌کارگیری روش کریجینگ معمولی، نقشه رستری قابلیت انتقال آبخوان دشت اردبیل تهیه شده است (شکل ۴- ج).

به‌منظور عینیت بخشیدن هرچه بیشتر مدل‌های پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از انتخاب

1- Global Digital Elevation Model-Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
2- Operational Land Imager
3- Normalized Difference Vegetation Index

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

سلیقه‌ای تعداد کلاس‌ها برای پارامترهای طیفی مؤثر در پتانسیل منابع آب زیرزمینی، برای انتخاب بهینه کلاس‌های پارامترهای طیفی از روش بهینه‌سازی جنکز (شکست طبیعی)[1] استفاده شده است. این روش، یک روش طبقه‌بندی است که دامنه بهینه‌ای را برای کلاس‌های مختلف داده‌ها تعیین می‌کند و کمترین میانگین انحرافات از میانگین کلاس‌ها را جستجو می‌کند تا برای هر کلاس، بیشترین انحراف از میانگین کلاس‌های دیگر حاصل شود. بنابراین، هدف این روش، کاهش واریانس داده‌ها در هر کلاس و بیشینه نمودن واریانس داده‌ها بین کلاس‌های مختلف می‌باشد (۸).

برای انتخاب بهینه تعداد کلاس‌ها برای پارامترهای طیفی، ابتدا هر یک از این پارامترها با استفاده از روش بهینه‌سازی جنکز در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 به گروه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ کلاسی تقسیم‌بندی شدند. سپس، برای هریک از کلاس‌ها، میانگین واقعی (AM_i) و میانگین اسمی (NM_i) محاسبه شد. در واقع، میانگین واقعی، برابر است با میانگین حسابی داده‌های موجود در کلاس مورد نظر i و میانگین اسمی، برابر است با میانگین حسابی اعداد ابتدا و انتهای بازه‌ی کلاس i. در گام بعدی نیز مجموع قدر مطلق انحرافات برای هریک از کلاس‌بندی‌ها (SAD)[2] با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه شد:

$$SAD = \sum_{i=1}^{n} |AM_i - NM_i| \qquad (۲)$$

در نهایت، هر کلاس‌بندی که دارای کمترین مقدار SAD بود، به‌عنوان کلاس‌بندی مناسب برای پارامتر طیفی مورد نظر انتخاب گردید (۲۰).

مدل شاخص آنتروپی

آنتروپی یک سیستم بیانگر میزان ناپایداری، بی‌نظمی، بی‌ثباتی و عدم قطعیت در آن سیستم می‌باشد (۲۳). شاخص آنتروپی که به آنتروپی شانون[3] نیز معروف است، به متوسط غیر قابل پیش‌بینی بودن یک متغیر تصادفی گفته می‌شود که با میزان اطلاعات و داده‌های آن هم‌ارز می‌باشد (۲).

به منظور تعیین وزن‌های مربوط به پارامترهای مؤثر منابع آب‌های زیرزمینی به روش مدل شاخص آنتروپی معادله‌های (۳) تا (۸) به ترتیب مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲، ۱۴):

$$FR_i = \frac{b}{a} \qquad (۳)$$

$$P_{ij} = \frac{FR_i}{\sum_{i=1}^{S_j} FR_i} \qquad (۴)$$

$$H_j = -\sum_{i=1}^{S_j} P_{ij} \log_2 P_{ij}, j = 1, \dots, n \qquad (۵)$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j \qquad (۶)$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \qquad (۷)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \qquad (۸)$$

که در آن‌ها، FR_i نسبت فراوانی کلاس i، b درصد مساحت مربوط به کلاس موردنظر نسبت به کل مساحت منطقه، a درصد تعداد چاه‌های پرآب مرحله آموزش واقع در کلاس موردنظر نسبت به تعداد کل چاه‌های پرآب مرحله آموزش، P_{ij} چگالی احتمال کلاس i برای پارامتر j، S_j تعداد کل کلاس‌های پارامتر j، H_j و H_{jmax} مقادیر آنتروپی و بیشینه آنتروپی، n تعداد پارامترهای مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، I_j ضریب اطلاعات و W_j وزن محاسبه شده برای پارامتر j می‌باشند.

سپس با توجه به وزن‌های محاسبه شده برای پارامترهای موردنظر، رتبه‌بندی پارامترها انجام می‌پذیرد که به پارامتری که کمترین مقدار وزن را دارا است، رتبه ۱ و به‌ترتیب با افزایش مقدار وزن، یک رتبه به آن پارامتر افزوده می‌شود. لذا پارامتری که بیشترین مقدار وزن برای آن محاسبه شده باشد، بیشترین رتبه را دارا خواهد بود.

در نهایت با استفاده از رابطه‌ی (۹)، شاخص پتانسیل آب‌های زیرزمینی برای مدل شاخص آنتروپی محاسبه می‌شود:

$$GPI = \sum_{i=1}^{m} r_i SR_i \qquad (۹)$$

که در آن GPI: شاخص پتانسیل آب‌های زیرزمینی، اندیس i: مربوط به لایه‌ی زیرسیستم، r_i: رتبه‌بندی لایه مورد نظر و همچنین SR_i: لایه‌ی رستری استاندارد شده‌ی مورد نظر
می‌باشد.

مدل نایو بیز

مدل نایو بیز، یک روش یادگیری ماشینی بر مبنای تئوری بیز می‌باشد که در آن فرض می‌شود، تمامی پارامترها یا زیرسیستم‌ها مستقل از همدیگر می‌باشند که به آن فرض استقلال مقید[4] گفته می‌شود (۲۴). از مزایای این روش می‌توان به ساده بودن مدل‌سازی اشاره کرد که بدون نیاز به تخمین پارامترهای پیچیده صورت می‌پذیرد (۲۹).

با در نظر گرفتن K داده‌ی ورودی مشاهداتی x_i $(i=1,2,\dots,k)$ و داده خروجی y_j (j کلاس دارای پتانسیل $\{۱\}$ یا کلاس فاقد پتانسیل منابع آب زیرزمینی $\{-۱\}$)، مدل نایو بیز مقدار احتمال $P(y_j/x_i)$ برای تمامی کلاس‌های خروجی محاسبه می‌کند. محاسبه برای کلاسی با بیشترین احتمال پسین انجام می‌پذیرد (۲۵):

$$y_{NB} = argmax P(y_i)_{y_j \in \{-1,1\}} \prod_{i=1}^{n} P(x_i/y_j) \qquad (۱۰)$$

احتمال پیشین $P(y_j)$ با استفاده از قسمتی از داده‌های مشاهداتی با داده خروجی y_j در قسمت آموزش محاسبه می‌شود و احتمال مقید $P(x_i/y_j)$ با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$P\left(\frac{x_i}{y_j}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x_i-\mu)^2/2\sigma^2} \qquad (۱۱)$$

که در آن μ میانگین و σ انحراف معیار x_i می‌باشند.

1- Natural Break 2- Sum of Absolute Deviations 3- Shannon's Entropy 4- Conditional independence

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

قبل از فرآیند مدل‌سازی به روش مدل نایو بیز، تمامی پارامترهای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از رابطه (۱۲) بین ۰/۱ و ۰/۹ استانداردسازی شدند (۲۵):

$$V_S = \frac{V - Min(V)}{Max(V) - Min(V)}(0.8) + 0.1 \qquad (۱۲)$$

برای انجام فرآیند محاسبات با استفاده از مدل نایو بیز، کدنویسی در نرم‌افزار Wolfram Mathematica 10.3 صورت پذیرفته است.

ارزیابی نتایج حاصل از پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی

عملکرد مدل‌های پتانسیل‌یابی را می‌توان با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)[1] و معیار مساحت زیر منحنی (AUC)[2] مورد ارزیابی قرار داد (۶). این منحنی، یک نمودار توصیفی است که در آن، مقادیر نرخ مثبت واقعی در مقابل مقادیر نرخ مثبت کاذب ترسیم می‌شوند. معیار مساحت زیر منحنی، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وجود چاه پرآب) و عدم وقوع رخداد (نبود چاه پرآب) است. مقادیر AUC از ۰ تا ۱ متغیر است. هرچه این معیار به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقیق بودن و برتری مدل پتانسیل‌یابی می‌باشد (۱۵).

در این مطالعه، برای ترسیم منحنی ROC و محاسبه معیار AUC برای مدل‌های پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی از ابزار ROC نرم‌افزار IDRISI Selva 17 استفاده شد.

نتایج و بحث

تهیه معیارها و زیرمعیارهای مربوط به مدل‌سازی پتانسیل آب زیرزمینی

به‌منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل، تمامی پارامترهای مورد استفاده، به‌صورت لایه‌های رستری ۳۰ متری تهیه گردیده‌اند و همچنین کلاس‌بندی بهینه پارامترهای طیفی مورد استفاده، با استفاده از روش بهینه‌سازی جنکز صورت پذیرفت (شکل ۳ و ۴).

به‌عنوان نمونه، کلاس‌بندی بهینه‌ی پارامتر طبقات ارتفاعی زمین در جدول (۲) ارائه شده است.

با توجه به جدول مذکور، کمترین مقدار *SAD* برای طبقه‌بندی پنج‌کلاسه با مقدار ۱۰۹/۹ محاسبه شده است. لذا این کلاس‌بندی، به‌عنوان مناسب‌ترین کلاس‌بندی برای پارامتر طبقات ارتفاعی زمین انتخاب شده است.

جدول ۲- تعیین بهینه تعداد کلاس‌های پارامتر طیفی طبقات ارتفاعی زمین (متر) براساس الگوریتم بهینه‌سازی جنکز

Table 2. Result of Jenks optimization approach for elevation subsystem

تعداد کلاس‌ها	دامنه‌ی کلاس‌ها براساس الگوریتم بهینه‌سازی جنکز	AM_i (میانگین واقعی)	NM_i (میانگین اسمی)	*SAD*
۲	۱۲۷۸ – ۱۵۶۳	۱۳۷۷/۶	۱۴۲۰/۵	۲۰۶/۰
	۱۵۶۳/۱ – ۲۲۶۲	۱۷۴۹/۴	۱۹۱۲/۵	
۳	۱۲۷۸ – ۱۴۳۳	۱۳۵۶/۲	۱۳۵۵/۵	۱۷۱/۹
	۱۴۳۳/۱ – ۱۶۷۶	۱۵۱۱/۰	۱۵۵۴۴/۵	
	۱۶۷۶/۱ – ۲۲۶۲	۱۸۴۱/۳	۱۹۶۹/۰	
۴	۱۲۷۸ – ۱۳۹۴	۱۳۴۴/۶	۱۳۳۶/۰	۱۶۳/۷
	۱۳۹۴/۱ – ۱۵۳۵	۱۴۴۴/۱	۱۴۶۴/۵	
	۱۵۳۵/۱ – ۱۷۶۳	۱۶۲۶/۵	۱۶۴۹/۰	
	۱۷۶۳/۱ – ۲۲۶۲	۱۹۰۰/۳	۲۰۱۲/۵	
۵	۱۲۷۸ – ۱۳۸۲	۱۳۴۰/۶	۱۳۳۰/۰	۱۰۹/۹
	۱۳۸۲/۱ – ۱۴۹۱	۱۴۲۴/۱	۱۴۳۶/۵	
	۱۴۹۱/۱ – ۱۶۶۶	۱۵۵۹/۳	۱۵۷۸/۵	
	۱۶۶۶/۱ – ۱۸۹۶	۱۷۷۲/۸	۱۷۸۱/۰	
	۱۸۹۶/۱ – ۲۲۶۲	۲۰۱۹/۵	۲۰۷۹/۰	

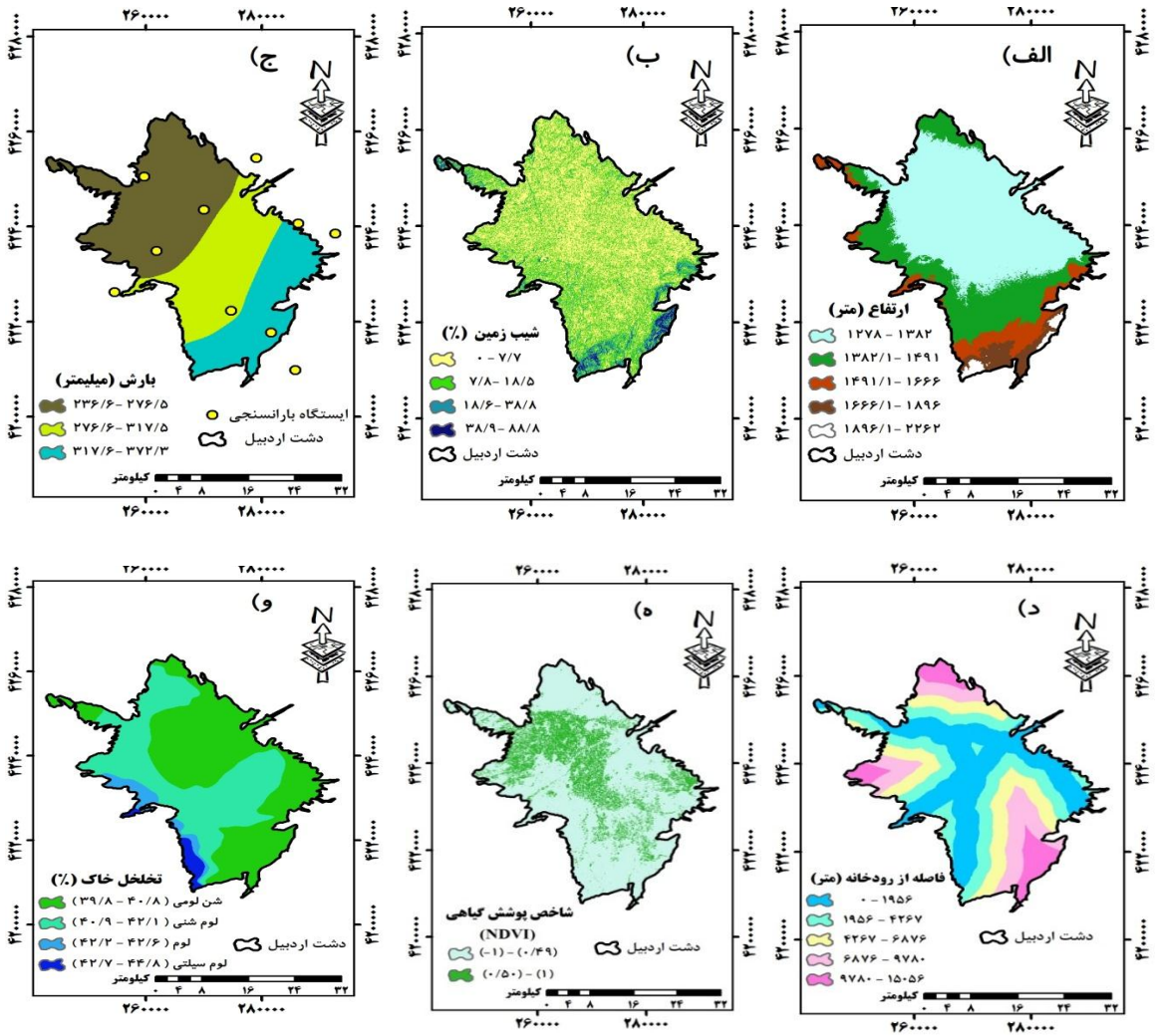
1- Receiver Operating Characteristic

3- Area Under the ROC Curve

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]

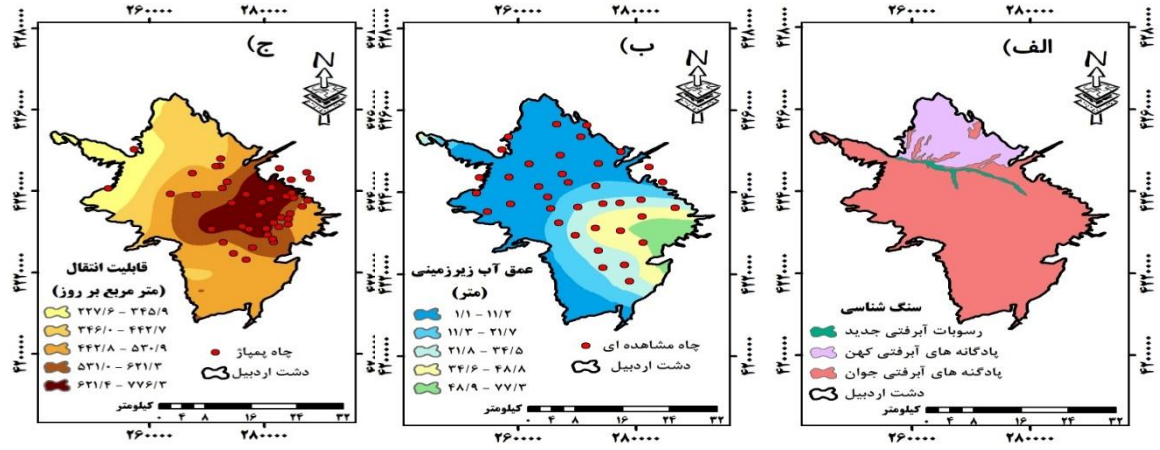
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]

[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]



شکل ۳- لایه‌های سطحی مورد استفاده در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل: الف) طبقات ارتفاعی، ب) شیب زمین، ج) بارش، د) فاصله از رودخانه، ه) شاخص پوشش گیاهی و) خاک‌شناسی، ز) کاربری اراضی

Figure 3. Surface layers for groundwater potential modeling in Ardabil Plain: a) elevation; b) slope; and c) rainfall; d) distance from river; e) NDVI; f) Soil; g) land cover.



شکل ۴- لایه‌های زیرزمینی مورد استفاده در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل: الف) سنگ‌شناسی، ب) عمق آب زیرزمینی، ج) قابلیت انتقال آبخوان

Figure 4. Subsurface layers for groundwater potential modeling in Ardabil Plain: a) lithology; b) groundwater depth; and c) transmissivity

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

مدل شاخص آنتروپی

مدل شاخص آنتروپی برای مدل‌سازی پتانسیل آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از پارامترهای مؤثر و همچنین داده‌های مرحله‌ی آموزش (۵۸۹ چاه پر آب) تهیه گردید و وزن هریک از پارامترها از طریق رابطه‌های (۳) تا (۸) محاسبه شد و سپس بر اساس وزن‌ها، رتبه‌بندی پارامترها صورت پذیرفت (جدول ۳). با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود، براساس مدل شاخص آنتروپی، پارامترهای شاخص پوشش گیاهی، تخلخل خاک و کاربری اراضی که به‌ترتیب دارای رتبه‌های ۱۰، ۹ و ۸ و وزن‌های ۰/۱۹، ۰/۱۲ و ۰/۱۱۱ هستند، بیشترین تأثیر را در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل دارند و پارامترهای طبقات ارتفاعی زمین، شیب زمین، سنگ‌شناسی و بارش در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، براساس مدل مذکور، پارامترهای قابلیت انتقال آبخوان، عمق آب زیرزمینی و فاصله از رودخانه به‌ترتیب با رتبه‌های ۱، ۲و ۳ و وزن‌های ۰/۰۰۷، ۰/۰۱ و ۰/۰۱۶ کمترین نقش را در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل ایفا می‌کنند.

در نهایت، مقادیر شاخص پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد و این مقادیر با استفاده از روش کوانتیل[1]، که توسط نام‌پاک و همکاران (۱۲) و رحمتی و همکاران (۱۹)، روشی دقیق برای طبقه‌بندی مقادیر شاخص پتانسیل منابع آب زیرزمینی معرفی شده است، به چهار کلاس دارای پتانسیل کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد تفکیک شد و نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل براساس مدل شاخص آنتروپی به‌دست آمد (شکل ۵).

جدول (۴) مساحت تحت پوشش هریک از کلاس‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل براساس مدل شاخص آنتروپی را نشان می‌دهد. بر اساس جدول مذکور، ۵۰/۰۴٪ از مساحت دشت اردبیل دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی زیاد و خیلی‌زیاد می‌باشد، ۲۵/۱۴٪ از دشت اردبیل دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی متوسط و ۲۴/۸۲٪ نیز دارای پتانسیل کم می‌باشد.

مدل نایو بیز

قبل از تهیه مدل نایو بیز، پارامترهای مورد استفاده در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) استانداردسازی شدند. سپس، به داده‌های مرحله آموزش تهیه شده (۵۸۹ چاه پر آب)، مقدار ۱ داده شد و به همان تعداد، از نواحی که چاه‌های پر آب وجود نداشت، نقاط تصادفی انتخاب و تولید شد و به این نقاط نیز مقدار ۱- داده شد و داده‌های متغیر وابسته تهیه گردید. در گام بعدی، به تمامی نقاط مورد نظر (در مجموع، ۱۱۷۸ نقطه)، مقادیر استاندارد شده پارامترهای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 استخراج شد و داده‌های متغیرهای مستقل نیز تهیه شدند.

برای آموزش مدل کلاس‌بندی نایو بیز، کدی در محیط نرم‌افزار Wolfram Mathematica 10.3 نوشته شده و پس از آموزش مدل، مقادیر احتمالاتی مقدار ۱ متغیر وابسته‌ی مربوط به مرحله آموزش (مقادیر احتمالاتی نقاط چاه‌های پر آب مرحله آموزش)، به‌عنوان شاخص پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل تهیه شده است (۲۵).

در نهایت، کلاس‌بندی شاخص پتانسیل حاصله، همانند مدل شاخص آنتروپی انجام گرفت و نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی بر اساس مدل نایو بیز به‌دست آمد (شکل ۶).

جدول (۵) مساحت تحت پوشش هریک از کلاس‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی مدل نایو بیز مربوط به دشت اردبیل را نشان می‌دهد. براساس جدول مذکور ۴۹/۸۵٪ از مساحت دشت اردبیل دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی زیاد و خیلی زیاد می‌باشد و ۲۵/۴۵٪ از دشت اردبیل دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی متوسط و ۲۴/۷۰٪ نیز دارای پتانسیل کم می‌باشد.

1- Quantile classification method

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

جدول ۳- مدل‌سازی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل براساس مدل شاخص آنتروپی

Table 3. Groundwater Potential modeling by using Index of Entropy model

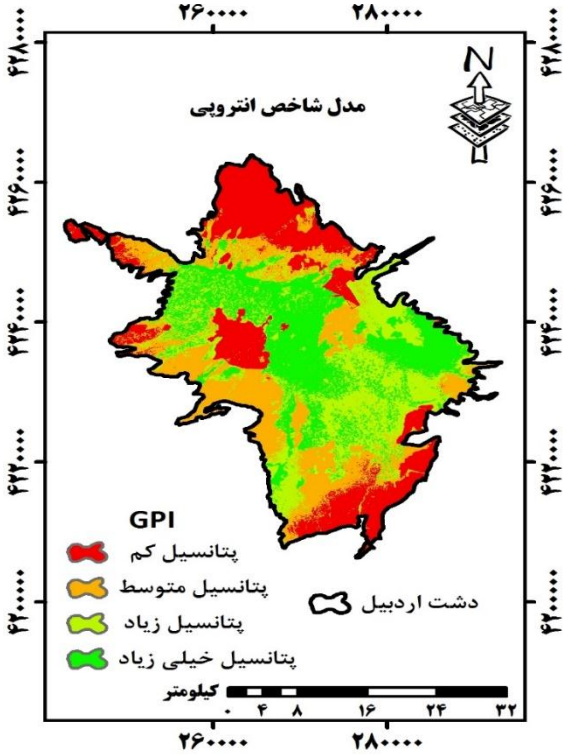
پارامتر	دامنه	٪ مساحت (a)	٪ چاه پرآب (b)	FR (b/a)	Pij	Hj	Hjmax	Ij	Wj	رتبه
طبقات ارتفاعی (متر)	۱۳۸۲ – ۱۲۷۸	۵۶/۴	۸۷/۶	۱/۵۵	۰/۷۲	۱/۱۲۳	۲/۳۲۲	۰/۵۱۷	۰/۱۰۳	۷
	۱۴۹۱ – ۱۳۸۲/۱	۲۷/۴	۱۰/۲	۰/۳۷	۰/۱۷					
	۱۶۶۶ – ۱۴۹۱/۱	۹/۶	۲/۲	۰/۲۳	۰/۱۱					
	۱۸۹۶ – ۱۶۶۶/۱	۵/۰	۰	۰	۰					
	۲۲۶۲ – ۱۸۹۶/۱	۱/۶	۰	۰	۰					
شیب (درصد)	۷/۷ – ۰	۵۸/۷	۷۰/۳	۱/۲۰	۰/۵۳	۱/۳۱۴	۲	۰/۳۴۳	۰/۰۸۶	۶
	۱۸/۵ – ۷/۸	۳۲/۵	۲۸/۴	۰/۸۹	۰/۳۹					
	۳۸/۸ – ۱۸/۶	۷/۲	۱/۴	۰/۱۹	۰/۰۸					
	۸۸/۸ – ۳۸/۹	۱/۶	۰	۰	۰					
بارش (میلی متر)	۲۷۶/۵ – ۲۳۶/۶	۴۴/۶	۶۰/۸	۱/۳۷	۰/۵۰	۱/۴۷۳	۱/۵۸۵	۰/۰۷۱	۰/۰۲۴	۴
	۳۱۷/۵ – ۲۷۶/۶	۳۰/۴	۲۶/۷	۰/۸۸	۰/۳۲					
	۳۷۲/۳ – ۳۱۷/۶	۲۵/۲	۱۲/۶	۰/۵۰	۰/۱۸					
فاصله از رودخانه (متر)	۱۹۵۶ – ۰	۳۲/۲	۴۸/۴	۱/۵۰	۰/۳۶	۲/۱۴۰	۲/۳۲۲	۰/۰۷۸	۰/۰۱۶	۳
	۴۲۶۷ – ۱۹۵۶	۲۴/۶	۲۸/۴	۱/۱۵	۰/۲۸					
	۶۸۷۶ – ۴۲۶۷	۱۸/۷	۱۲/۱	۰/۶۵	۰/۱۵					
	۹۷۸۰ – ۶۸۷۶	۱۵/۱	۷/۶	۰/۵۱	۰/۱۲					
	۱۵۰۵۶ – ۹۷۸۰	۹/۵	۳/۶	۰/۳۸	۰/۰۹					
شاخص پوشش گیاهی	۰/۴۹ — ۱-	۷۷/۵	۳۸/۵	۰/۵۰	۰/۱۵	۰/۶۲۰	۱/۰۰۰	۰/۳۸۰	۰/۱۹۰	۱۰
	۱ — ۰/۵۰	۲۲/۵	۶۱/۵	۲/۷۳	۰/۸۵					
تخلخل خاک (درصد)	۴۰/۸ – ۳۹/۸	۵۲/۱	۷۱/۳	۱/۳۷	۰/۶۵	۱/۰۴۲	۲/۰۰۰	۰/۴۷۹	۰/۱۲۰	۹
	۴۲/۱ – ۴۰/۹	۴۱/۲	۲۸/۵	۰/۶۹	۰/۳۳					
	۴۲/۶ – ۴۲/۲	۴/۱	۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۲					
	۴۴/۸ – ۴۲/۷	۲/۶	۰	۰	۰					
کاربری اراضی	مناطق مسکونی	۴/۴	۳/۹	۰/۸۹	۰/۳۱	۱/۰۳۱	۲/۳۲۲	۰/۵۵۶	۰/۱۱۱	۸
	اراضی بایر	۰/۸	۰	۰	۰					
	اراضی دیم و مراتع	۴۶/۲	۲/۹	۰/۰۶	۰/۰۲					
	زراعت آب	۴۸/۴	۹۳/۲	۱/۹۳	۰/۶۷					
	سطوح آبی	۰/۲	۰	۰	۰					
سنگ‌شناسی آبدهی ویژه (٪)	پادگانه‌های آبرفتی کهن	۱۶/۲	۱۶/۸	۱/۰۳	۰/۲۱	۱/۳۶۰	۱/۵۸۵	۰/۱۴۲	۰/۰۴۷	۵
	پادگانه‌های آبرفتی جوان	۸۲/۱	۷۸/۱	۰/۹۵	۰/۱۹					
	رسوبات آبرفتی جدید	۱/۷	۵/۱	۳/۰۶	۰/۶۱					
عمق آب زیرزمینی (متر)	۱۱/۲ – ۱/۱	۵۳/۴	۵۶/۴	۱/۰۶	۰/۲۴	۲/۲۰۶	۲/۳۲۲	۰/۰۵۰	۰/۰۱۰	۲
	۲۱/۷ – ۱۱/۳	۱۵/۹	۱۴/۸	۰/۹۳	۰/۲۱					
	۳۴/۵ – ۲۱/۸	۱۴/۲	۱۶/۳	۱/۱۴	۰/۲۶					
	۴۸/۸ – ۳۴/۶	۱۰/۸	۱۱/۰	۱/۰۳	۰/۲۳					
	۷۷/۳ – ۴۸/۹	۵/۶	۱/۵	۰/۲۷	۰/۰۶					
قابلیت انتقال (متر مربع در روز)	۳۴۵/۹ – ۲۲۷/۶	۱۲/۸	۶/۶	۰/۵۲	۰/۱۰	۲/۲۴۵	۲/۳۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۰۷	۱
	۴۴۲/۷ – ۳۴۶/۰	۲۱/۱	۲۷/۵	۱/۳۱	۰/۲۶					
	۵۳۰/۹ – ۴۴۲/۸	۳۶/۶	۲۸/۷	۰/۷۸	۰/۱۵					
	۶۲۱/۳ – ۵۳۱/۰	۱۶/۷	۲۲/۶	۱/۳۵	۰/۲۶					
	۷۷۶/۳ – ۶۲۱/۴	۱۲/۸	۱۴/۶	۱/۱۴	۰/۲۲					

جدول ۴- مساحت کلاس‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل براساس مدل شاخص آنتروپی

Table 4. Distribution of GPI classes and areas covered by each of these classes based on IE model

کلاس پتانسیلی	دامنه شاخص پتانسیلی	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)
کم	۳۳/۷۴ — ۲۵/۵۸	۲۹۶/۵۹	۲۴/۸۲
متوسط	۳۶/۶۶ — ۳۳/۷۵	۳۰۰/۴۵	۲۵/۱۴
زیاد	۳۸/۵۰ — ۳۶/۶۷	۳۰۰/۷۷	۲۵/۱۷
خیلی زیاد	۴۳/۶۲ — ۳۸/۵۱	۲۹۷/۱۹	۲۴/۸۷

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]



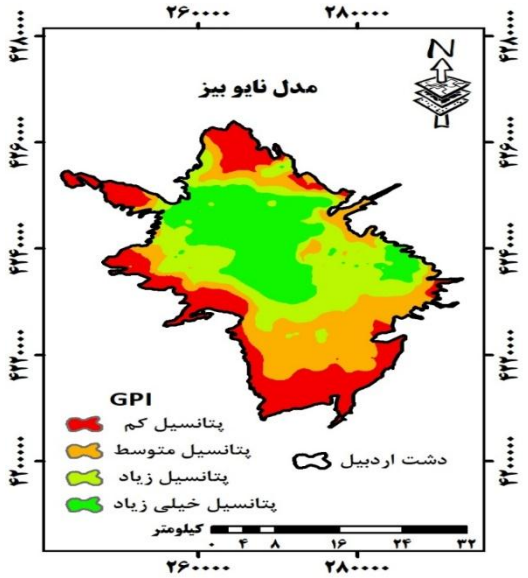
شکل ۵- نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل براساس مدل شاخص آنتروپی

Figure 5. Groundwater potential map based on Index of Entropy model

جدول ۵- مساحت کلاس‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل براساس مدل نایو بیز

Table 5. Distribution of GPI classes and areas covered by each of these classes based on NB model

کلاس پتانسیلی	دامنه شاخص پتانسیلی	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)
کم	۰ — ۰/۰۷	۲۹۵/۲۳	۲۴/۷۰
متوسط	۰/۰۸ — ۰/۲۳	۳۰۴/۰۹	۲۵/۴۵
زیاد	۰/۲۴ — ۰/۶۳	۲۹۸/۱۳	۲۴/۹۵
خیلی زیاد	۰/۶۴ — ۱	۲۹۷/۵۵	۲۴/۹۰



شکل ۶- نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل براساس مدل نایو بیز

Figure 6. Groundwater potential map based on Naïve Bayes model

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی پتانسیل آب زیرزمینی و مقایسه مدل‌ها

در شکل (۷) منحنی‌های مشخصه عملکرد سیستم مدل‌های شاخص آنتروپی و نایو بیز براساس داده‌های مرحله صحت‌سنجی نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد هر دو مدل از دقت قابل قبولی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل برخوردار می‌باشند. مدل یادگیری ماشینی نایو بیز با معیار مساحت زیر منحنی ۰/۸۲۱، دارای برتری نسبی نسبت به مدل عینی شاخص آنتروپی با معیار مساحت زیر منحنی ۰/۷۲۸ در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل است.

با توجه به معیار سطح زیر منحنی به‌دست آمده برای مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر، نتایج این تحقیق با مطالعات پژوهشگرانی از قبیل نقیبی و همکاران (۱۴،۱۳)، ذبیحی و همکاران (۳۰) هم‌خوانی دارد (جدول ۶).

بر اساس مساحت اختصاص یافته به کلاس‌های پتانسیلی مختلف مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق (جدول ۴ و ۵)، مدل شاخص آنتروپی با اختصاص کمترین مساحت به کلاس پتانسیلی کم و متوسط، و بیشترین مساحت به کلاس پتانسیلی زیاد و خیلی زیاد، نسبت به مدل نایو بیز، مدل خوش‌بینانه‌تری به‌نظر می‌رسد.

با توجه به شکل‌های (۵ و ۶) نواحی مرکزی و شرقی دشت اردبیل دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالاتری نسبت به حاشیه‌های شمالی، جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی می‌باشند.

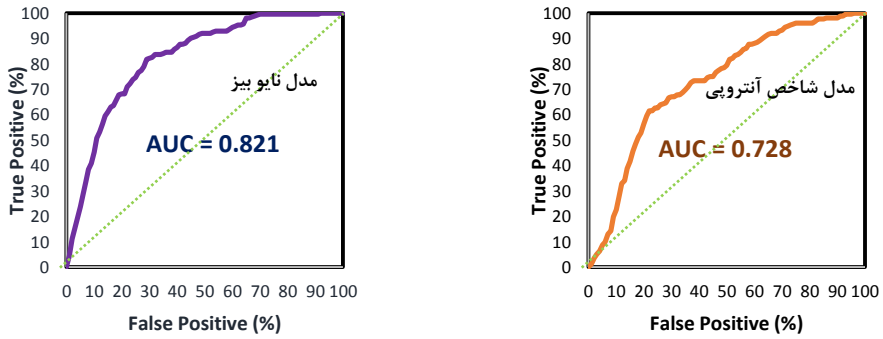
امیر احمدی و همکاران (۳) به تعیین و بررسی علل فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداخته‌اند و با مطالعه و پهنه‌بندی افت آب‌های زیرزمینی دشت اردبیل، نواحی جنوب شرقی دشت اردبیل را مستعد فرونشست زمین بر اثر افت خیلی زیاد تراز آب‌های زیرزمینی معرفی کردند. براساس نتایج تحقیق حاضر نیز، این نواحی پتانسیل آب زیرزمینی کمی دارند و برداشت بی‌رویه از این نواحی ممکن است باعث تشدید فرونشست زمین گردد.

با توجه به پیچیدگی مطالعات منابع آب زیرزمینی و اهمیت موضوع در کشور ما، به نظر می‌رسد علاوه بر مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، از مدل‌های هوشمند جدید نظیر ماشین بردار پشتیبان و همچنین مدل‌های هیبریدی در مطالعات آتی و بررسی پتانسیل آب زیرزمینی دشت‌های کشور مد نظر قرار گیرد.

جدول ۶- نتایج مطالعات قبلی صورت گرفته برای پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی با مدل‌های شاخص آنتروپی و نایو بیز

Table 6. The results of previous researches of groundwater potential mapping based on IE and NB models

پژوهشگران	منطقه مورد مطالعه	مدل (معیار مساحت زیر منحنی)
نقیبی و همکاران (۱۳)	منطقه کاشمر	مدل نایو بیز (۰/۸۴۴)
نقیبی و همکاران (۱۴)	حوضه آبریز مغان	مدل شاخص آنتروپی (۰/۹۱۲)
ذبیحی و همکاران (۳۰)	دشت بجنورد	مدل شاخص آنتروپی (۰/۸۵۶)



شکل ۷- منحنی‌های مشخصه‌ی عملکرد سیستم و معیارهای AUC مدل‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل

Figure 7. ROC analysis of IE and NB models for groundwater potential mapping in Ardabil Plain

تشکر و قدردانی

بدینوسیله مولفین این مقاله تحقیقاتی از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل و همچنین اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اردبیل به‌خاطر در اختیار گذاشتن داده‌ها و اطلاعات مربوط به دشت اردبیل، تقدیر و تشکر می‌نماید. همچنین از داوران محترم که موجب ارتقا کیفیت علمی مقاله گردیده‌اند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

منابع

1. Ahmed, K., S. Shahid and S. Bin Harun and T. Ismail, N. Nawaz and S. Shamsudin. 2014. Assessment of groundwater potential zones in an arid region based on catastrophe theory. Earth Science Informatics, 8: 539-549.
2. Al-Abadi, A.M. and S. Shahid. 2015. A comparison between index of entropy and catastrophe theory methods for mapping groundwater potential in an arid region. Environmental Monitoring and Assessment, 187: 576.
3. Amirahmadi, G., N.M. Ahari and T. Ahmadi. 2014. The Determination of Probable Subsidence Areas of Ardebil Plain by the Use of GIS. Journal of Geography and Planning, 46: 1-23 (In Persian).
4. Anonymous. 2011. Water resources facts of Ardabil Province. Water resources potential white paper. Department of Improvement and Management of Water Resources. Ardabil Regional Water Authority. Ardabil. Iran (In Persian).
5. Chowdhury, A., M.K. Jha, V.M. Chowdary and B.C. 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: 231-250.
6. Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 27(8): 861-874.
7. Jaiswal, R.K., S. Mukherjee, J. Krishnamurthy and R. Saxena. 2003. Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development–an approach. International Journal of Remote Sensing, 24: 993-1008.
8. Jenks, G.F. 1967. The data model concept in statistical mapping. International Yearbook of Cartography, 7: 186-190.
9. Jha, M.K., A. Chowdhury, V.M. Chowdary and S. Peiffer. 2007. Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. Water Resources Management, 21: 427-467.
10. Ke, Y., J. Im, J. Lee, H. Gong and Y. Ryu. 2015. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. Remote Sensing of Environment, 164: 298-313.
11. Kord, M., A. Asghari-Moghaddam and M. Nakhaeei. 2013. Investigation of hydrogeological characteristics of Ardabil Plain aquifer, Northwest of Iran. ISESCO Journal of Science and Technology, 9(15): 63-69.
12. Nampak, H., B. Pradhan and M.A. Manap. 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. Journal of Hydrology, 513: 283-300.
13. Naghibi, S.A., D.D. Moghaddam, B. Kalantar, B. Pradhan and O. Kisi. 2017. A Comparative Assessment of GIS-Based Data Mining Models and a Novel Ensemble Model in Groundwater Well Potential Mapping, Journal of Hydrology, 548: 471-483.
14. 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, Iraq. Earth Sciences Informatics, 8: 171-186.
15. Pourghasemi, H.R., A.G. Jirandeh, B. Pradhan, C. Xu and C. Gokceoglu. 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. Journal of Earth System Science, 2: 349-369.
16. Prasad, R.K., N.C. Mondal, P. Banerjee, M.V. Nandakumar and V.S. Singh. 2008. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. Environmental Geology, 55: 467-475.
17. Preeja, K.R., S. Joseph, J. Thomas and H. Vijith. 2011. Identification of groundwater potential zones of a tropical river basin (Kerala, India) using remote sensing and GIS techniques. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 39: 83-94.
18. Rahimi, D. 2012. Potential ground water resources: (Case study: Shahrekord plain). Geography and Environmental Planning, 22(4): 127-142 (In Persian).
19. Rahmati, O., H.R. Pourghasemi and A.M. Melesse. 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.
20. Sadeghfam, S., Y. Hassanzadeh, A.A. Nadiri and R. Khatibi. 2016. Mapping groundwater potential field using catastrophe fuzzy membership functions and Jenks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. Environmental Earth Sciences, 75: 545.
21. Seif, A. and A. Kargar. 2011. Groundwater potential mapping by using AHP and GIS (case study: Sirjan Watershed). Natural Geography, 12: 75-90 (In Persian).
22. Shahid, S., S.K. Nath and J. Roy. 2000. Groundwater potential modeling in a soft rock area using a GIS. International Journal of Remote Sensing, 21: 1919-1924.
23. Shi, Y. and F. Jin. 2009. Landslide stability analysis based on generalized information entropy. International Conference on Environmental Science Information Applied Technology, 2: 83-85.
24. Soria, D., J.M. Garibaldi, F. Ambrogi, E.M. Biganzoli and I.O. Ellis. 2011. A non-parametric version of the naive Bayes classifier. Knowledge-based Systems, 24(6): 775-784.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

25. Tien Bui, D., B. Pradhan, O. Lofman and I. Revhaug. 2012. Landslide susceptibility assessment in Vietnam using support vector machines, decision tree, and Naïve Bayes Models. Mathematical Problems in Engineering, 2012: Article ID 974638, 26 pp. doi:10.1155/2012/974638.
26. Todd, D.K. and L.W. Mays. 2005. Groundwater Hydrology. Third edition. Wiley & Sons, Incorporated. New Jersey.
27. UN. 2003. Water for people, water for life. The UN World Water Development Report (WWDR), UNESCO, Publishing and Berghahn Books, UK, 34 pp.
28. Vijith, H. 2007. Groundwater potential in the hard rock terrain of Western Ghats: a case study from kottayam district, Kerala using resourcesat (IRS-P6) data and GIS techniques. Journal of Indian Society of Remote Sensing, 35: 163-171.
29. Wu, X., V. Kumar, J.R. Quinlan, J. Ghosh and Q. Yang, et al. 2008. Top 10 algorithms in data mining. Knowledge and Information Systems, 14(1): 1-37.
30. Zabihi, M., H.R. 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 Persian).
31. Zandi, S., K. Solaimani and J. Zandi. 2015. Mapping Groundwater Spring Occurrence Potential using Logistic Regression Statistical Method (Case Study: Miredeh Mountainous Watershed, Kurdistan). Journal of Watershed Management Research, 12: 75-87 (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]

Groundwater Potential Mapping using Index of Entropy and Naïve Bayes Models at Ardabil Plain

Vahid Karimi[1], Mohamad Ali Ghorbani[2] and Sabereh Darbandi[3]

1- Graduated M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran (Corresponding Author: vahid.karimi22@yahoo.com)
2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University
3- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University
Received: November 11, 2017 Accepted: May 23, 2018

Abstract

Although groundwater resources have long been selected as a safe choice for resolving human water requirements, overexploitation of them, especially at Ardabil plain, has promoted a decrease in the quality and quantity of these resources. One of the significant solutions is to identification of the groundwater potential zones and exploitation of them according to their potentials. The aim of this study was to compared the efficiency of two objective models: Index of Entropy (IE) and Naïve Bayes (NB) in groundwater potential mapping of Ardabil plain, located in northwest of Iran. For this purpose, ten groundwater occurrence factors including elevation, slope, soil, rainfall, distance from river, land cover, normalized difference vegetation index (NDVI), lithology, groundwater depth, and transmissivity were used based on the availability of data. In order to reduce subjectivity in groundwater potential modeling, all spectral groundwater data layers were classified into objective classes by using Jenks optimization technique. After computing groundwater potential index for the models, receiver operating characteristic (ROC) curve and the area under the curves (AUC) were implemented for validation of the models. The AUC values for the IE and NB models are 0.728, and 0.821, respectively. The overall results approved that both of the models have good capability for demarcating groundwater potential zones but the NB model performed better than the IE model for groundwater potential mapping in Ardabil Plain. The results of accurate groundwater potential mapping at Ardabil plain can be useful for groundwater resources management and avoiding overexploitation in the plain.

Keywords: Ardabil Plain, Groundwater Potential, GIS, Index of Entropy Model, Naïve Bayes Model

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.4.0]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.22.273]