نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال دهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲
صفحات ۱۶۳ - ۱۸۲

استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی در دشت موسیان استان ایلام

نازنین سلیمی؛ گروه مهندسی طبیعت (مرتع و آبخیزداری)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
مرزبان فرامرزی[1]؛ گروه مهندسی طبیعت (مرتع و آبخیزداری)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
محسن توکلی؛ گروه مهندسی طبیعت (مرتع و آبخیزداری)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
حسن فتحی‌زاد؛ گروه مهندسی طبیعت (مرتع و آبخیزداری)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

دریافت مقاله :۱۴۰۱/۱۰/۲۷ پذیرش نهایی:۱۴۰۲/۰۸/۲۳

چکیده

امروزه میزان برداشت از آبهای زیرزمینی بیش از میزان تغذیه آبهای زیرزمینی است که این عامل باعث افت شدید سطح سفره‌های آب زیرزمینی شده است. مراتع و جنگل‌ها بعنوان اصلی‌ترین مکان‌های تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی محسوب می‌شوند، درحالی‌که بیشترین برداشت از این منابع در کاربری کشاورزی انجام می‌شود. هدف اصلی از پژوهش حاضر استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون جنگل تصادفی و تابع آنتروپی شانون برای مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی در مراتع نیمه‌خشک غرب ایران می‌باشد. برای این هدف، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی شامل: درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از گسل، شکل شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، بارندگی، لیتولوژی و کاربری اراضی تهیه شد. پس از تعیین وزن پارامترها با استفاده از تابع آنتروپی شانون و سپس تعیین طبقات آن‌ها، در محیط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، از ترکیب وزن پارامترها و طبقات آن‌ها نقشه نهایی مناطق دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی مدل‌سازی گردید. بعلاوه، برای اجرای مدل جنگل تصادفی از نرم‌افزار R ۳٫۵٫۱ و بسته randomForest استفاده شد. در تحقیق حاضر از اعتبارسنجی ضربدری k-fold برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده گردید. به منظور ارزیابی کارایی مدل‌های جنگل تصادفی و آنتروپی شانسون برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، از شاخص‌های آماری MAE، RMSE و R^2 استفاده شد. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل جنگل تصادفی با دقت (R^2 = ۰.۸۲۵, RMSE: ۳٫۴۱, MAE: ۲٫۸۵) دارای دقت بالاتری نسبت به مدل آنتروپی شانون با دقت (R^2 = ۰٫۷۲۷, RMSE: ۴٫۳۶, MAE: ۳٫۳۴) می‌باشد. یافته‌های مدل جنگل تصادفی نشان داد که قسمت زیادی از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل متوسط (۲۶۹۵۴/۲۲ هکتار) و مساحت خیلی اندکی (۲۰۵/۶۱ هکتار) بدون پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشد. از طرفی، نتایج مدل آنتروپی شانون نشان داد که قسمت اعظمی از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل متوسط (۲۴۶۳۳/۰۵ هکتار) و مساحت خیلی اندکی (۱۵۰۲/۱۲ هکتار) بدون پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشد.

واژه های کلیدی: پتانسیل آب زیرزمینی، مدل جنگل تصادفی، آنتروپی شانون، دشت موسیان.

[1] نویسنده مسئول: Email: m.faramarzi@ilam.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

مقدمه

در دهه‌های اخیر در بسیاری از نقاط دنیا به دلیل گسترش جمعیت و صنعتی شدن، آب‌های زیرزمینی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی شناخته شده‌اند (Jothibasu and Anbazhagan, ۲۰۱٦) و نقش حیاتی در توسعه پایدار کشاورزی، جامعه و اقتصاد ایفا می‌کنند (Pande et al., ۲۰۲۱). وجود آب زیرزمینی در هر نقطه از کره زمین، نتیجه برهم‌کنش بین عوامل مختلف اقلیمی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، فیزیوگرافی و اکولوژیکی است (Naghibi et al., ۲۰۱۷). به عنوان مثال، هر گونه تغییر کاربری از مرتع به کاربری‌های دیگر مانند کشاورزی و جنگل‌های دست کاشت باعث افت سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود (Yaghobi et al., ۲۰۱۹). حرکت آب زیرزمینی درون زمین تحت تاثیر عوامل مختلفی از قبیل سنگ‌شناسی، توپوگرافی، ساختار زمین شناسی، شکاف‌ها (تراکم، اندازه و ارتباط)، تخلخل ثانویه، تغذیه آب زیرزمینی، الگوی زهکشی، شکل زمین، پوشش زمین و شرایط اقلیمی است (Oh et al., ۲۰۱۱; Pourtaghi and Pourghasemi, ۲۰۱٤; Pradhan, ۲۰۰۹). بی‌گمان با در نظر گرفتن عوامل موثر می‌توان به تهیه‌ی نقشه‌ها و پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مختلف در هر منطقه به منظور مدیریت صحیح این منابع با ارزش پرداخت. از طرفی دیگر، وقوع خشکسالی‌های متناوب و طولانی و تغییرات اقلیمی از عوامل اصلی کمبود آب بویژه منابع آب سطحی است که فشار مضاعفی را بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کند (Halder et al., ۲۰۲۰).

با توجه به افزایش تقاضا برای منابع آب شیرین، دو ابزار سامانه‌ای اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) مناسب توسط مهندسین و برنامه‌ریزان برای مدیریت کارآمد استفاده از منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Oh et al., ۲۰۱۱). سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند در فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد زیرا GIS یک ابزار قدرتمند است (Nampak et al., ۲۰۱٤). محققان متعددی ترکیبی از ابزارهای GIS و سنجش از دور (RS) را برای ارزیابی نقشه‌برداری بالقوه آب‌های زیرزمینی در مقیاس متوسط تا منطقه‌ای استفاده کرده‌اند. با پیشرفت تکنیک‌ها و نرم‌افزارهای RS و GIS، نقشه برداری از پتانسیل آب زیرزمینی به روشی آسان و کارآمد تبدیل شده است (Tweed et al., ۲۰۰۷). با این حال، در کشورهای در حال توسعه و آستانه مانند ایران، فقدان شدید مجموعه داده‌های دقیق و کامل وجود دارد، به همین دلیل، داده‌های سنجش از دور برای درک وضعیت آب زیرزمینی و متعاقباً مدیریت آن ضروری است.

حرکت آب زیرزمینی درون زمین تحت تاثیر عوامل مختلفی از قبیل سنگ شناسی، توپوگرافی، ساختار زمین شناسی، شکاف‌ها (تراکم، اندازه و ارتباط)، تخلخل ثانویه، تغذیه آب زیرزمینی، الگوی زهکشی، شکل زمین، پوشش زمین و شرایط اقلیمی است (Pourtaghi et al., ۲۰۱٤). بی گمان با در نظر گرفتن عوامل موثر می‌توان به تهیه ی نقشه‌ها و پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مختلف در هر منطقه به منظور مدیریت صحیح این منابع با ارزش پرداخت. وقوع خشکسالی‌های متناوب و طولانی و نوسان زیاد آب و هوا از عوامل اصلی کمبود آب بویژه منابع آب سطحی است که فشار مضاعفی را بر منابع آب زیزمینی وارد می‌کند. براساس اجرای پژوهش‌های بیشتر در زمینه پتانسیل یابی، اکتشاف و بهره برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های متداول مورد استفاده برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی اصولاً براساس مطالعات و بازدیدهای صحرایی است (Ganapuram et al., ۲۰۰۹). با توجه به اینکه

اجرای آزمایش‌های اکتشافی منابع آب زیرزمینی نیازمند صرف زمان و هزینه بسیار زیادی است، استفاده از تکنیک‌های جدید ازجمله سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده مدیران و برنامه ریزان به منظور سیاست‌گذاری و برنامه ریزی‌های خرد و کلان کشور قرار گیرد. بر همین اساس تعیین مناطقی که دارای پتانسیل آب زیرزمینی هستند از ابزارهای مهم در حفاظت، مدیریت و بهره برداری از منابع آب است (Moghaddam et al., ۲۰۱۵).

از این نظر، محققان زیادی از روش‌ها و مدل‌های مختلف استفاده کرده‌اند برای مثال، خوش‌تیانت و همکاران (Khoshtianat et al., ۲۰۱۹) از روش‌های weights of evidence, weighting factor, and statistical index، هو و همکاران (Hou et al., ۲۰۱۸) از شاخص آماری، شاخص آنتروپی و مدل‌های قطعیت عوامل، نهو و همکاران (Nhu et al., ۲۰۲۰) از روش‌های Novel Ensemble Bivariate and Multivariate Models برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند. اخیراً، برخی محققان از الگوریتم‌های داده کاوی مانند BRT[۲]، KNN[۳]، LDA[۴]، QDA[۵] و RF[۶] برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند (Naghibi et al., ۲۰۱۶; Tien Bui et al., ۲۰۱۶).

منطقه مورد مطالعه در این تحیق در شهرستان دهلران در جنوب استان ایلام واقع شده است. طبق مطالعات قبلی این منطقه در کلاس خشک اقلیمی واقع شده است (Yaghobi et al., ۲۰۱۹) که دارای متوسط بارش کم و متوسط دمای سالانه بالایی می باشد. از طرفی، نظر به اهمیت موضوع و خشکسالی‌های به وقوع پیوسته در کشور و منطقه، شناسایی منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح این منابع به عنوان راهکار توسعه‌ی جامع و پایدار امری حائز اهمیت است. بنابراین، هدف اصلی از مطالعه حاضر، مدلسازی منابع آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مناطق خشک غرب ایران می‌باشد. الویت‌بندی فاکتورهای موثر بر مناطق مستعد آب‌زیرزمینی و همچنین بررسی کارایی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در مدل‌سازی منابع آب‌زیرزمینی از موضوعات دیگر این تحقیق می‌باشد.

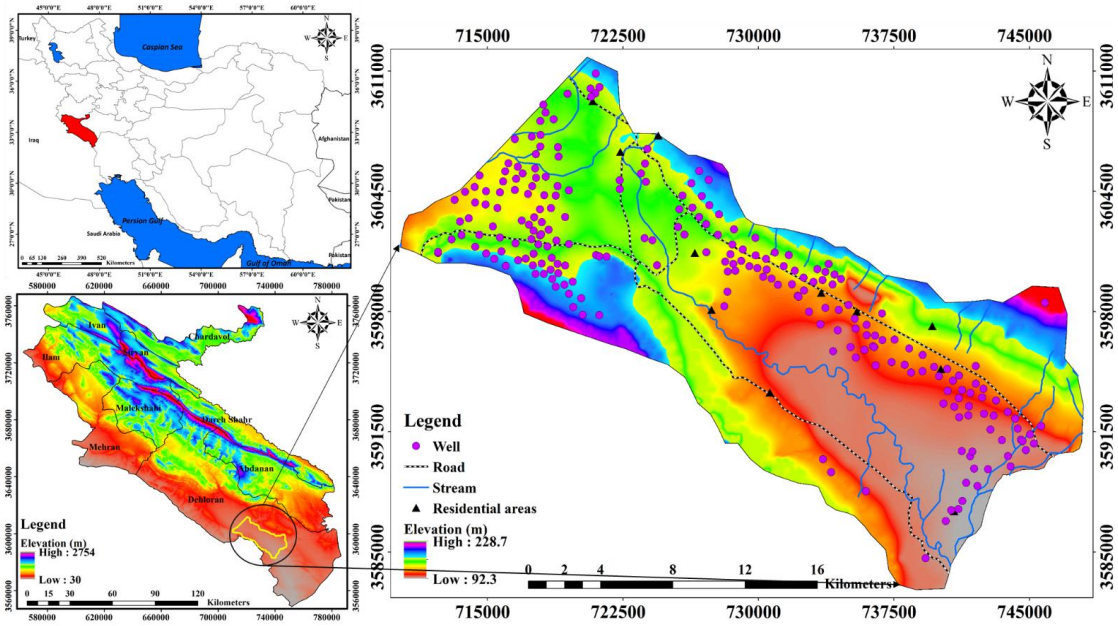
داده ها و روش کار

الف) قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه قسمتی از دشت موسیان است با وسعت ۴۲۸۷۵ هکتار، بین طول‌های جغرافیای ″۲۰ ′۱۴ ۴۷ تا″۱۲′۳۸ °۴۷ و عرض‌های جغرافیایی″۳۲′۲۱ °۳۲ تا″۱۴ ′۳۷ ۳۲ در غرب ایران قرار گرفته است (شکل ۱). میانگین ارتفاع، بارندگی و دما منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۳۴ متر، ۲۳۵/۲ میلی متر و ۲۶/۴ درجه سانتیگراد است. اقلیم این منطقه بر اساس طبقه بندی دمارتن داری اقلیم خشک است (de Martonne ۱۹۲۶). دمای میانگین خاک در عمق پنج سانتیمتری ۲۹/۴ و درعمق ده سانتی متری ۲۸/۸ واحد است.

[۲] Boosted Regression Trees
[۳] K nearest neighbor
[۴] Lnear discriminant analysis
[۵] Quadric discriminant analysis
[۶] Random forests

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]



شکل ۱- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، جاده‌ها، رودخانه‌ها و مناطق مسکونی در منطقه مورد مطالعه روی نقشه‌های استان ایلام و کشور ایران (لایه Digital Elevation Model منطقه، استخراج شده از نقشه توپوگرافی با قدرت تفکیک ۳۰ متر)

ب) داده‌های مورد نیاز

برای انجام مطالعات این تحقیق دو دسته داده لازم می‌باشد:

۱- داده‌های مربوط به چاه‌های منطقه مورد مطالعه

این داده ها از شرکت آب منطقه‌ای ایلام تهیه گردید. اطلاعات مربوط به ۲۳۶ حلقه چاه در منطقه مطالعاتی دشت موسیان استخراج گردید. از این آمار تمامی آمار موجود دبی، سطح سفره و موقعیت جغرافیایی چاه‌ها مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).

۲- تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز

لایه‌های اطلاعاتی شامل مدل رقومی ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، زمین شناسی، خاکشناسی، شاخص رطوبت توپوگرافی، تعادل سلولی، شکل زمین، تجمع جریان، گرادیان، شاخص قدرت جریان، شاخص ناهمواری زمین، حرارت روزانه انجماد می‌باشند.

۳- سپس داده‌ها و لایه‌های موجود، در مدل‌های آنتروپی شانون و جنگل تصادفی مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در نهایت نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی در هر یک از مدل‌ها استخراج گردید.

ج) روش تحقیق

به منظور اجرای پژوهش حاضر، نخست فاکتورهای توپوگرافی از قبیل درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، شکل زمین، شاخص ناهمواری زمین و غیره استخراج گردید. سپس فاکتورهای مرتبط با آب مانند شاخص رطوبت توپوگرافی، تجمع جریان، شاخص قدرت جریان، و غیره، فاکتورهای زمین‌شناسی، خاک‌شناسی (بافت خاک) و کاربری اراضی تهیه شد. همه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

لایه‌های اطلاعاتیمورد استفاده در این تحقیق شامل درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طول شیب، طبقه ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان،شاخص ناهمواری زمین، تجمع جریان، گرادیان، زمین‌شناسی و کاربری اراضی و غیره با توجه به سابقه‌ی پژوهش‌های مختلف صورت گرفته در جهان و ایران (Manap et al, ۲۰۱٤; Naghibi et al, ۲۰۱٥; Ozdemir, ۲۰۱۱; Rahmati et al, ۲۰۱٦) به عنوان عوامل موثر بر پتانسیل آب زیرزمینی از روی نقشه-های پایه (توپوگرافی، زمین شناسی و. . .) موجود با استفاده از الحاقیه‌های مختلف در محیط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی رقومی و تهیه شد. به این منظور با استفاده نقشه مدل رقومی ارتفاعی (Digital Elevation Model: DEM) فاکتورهای درجه شیب، جهت شیب، شکل شیب، طبقه ارتفاعی و شاخص رطوبت توپوگرافی از آن استخراج گردید. لایه اطلاعاتی کاربری اراضی از تصاویر ماهواره ای لندست استخراج شد. نقشه زمین‌شناسی منطقه تحقیق نیز از سازمان مربوطه تهیه و در محیط GIS رقومی و لایه‌های زمین‌شناسی، شکل زمین، شاخص ناهمواری زمین از آن استخراج شد. لایه‌های مربوط به آبراهه نیز از نقشه توپوگرافی منطقه تهیه شد. اطلاعات مربوط به سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از چاه‌های پیزومتری و بهره برداری ثبت شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استخراج گردید. برای تهیه نقشه لایه خاک از سایت (https://www.isric.org/explore/soilgrids) استفاده شده است (Hengl et al., ۲۰۱۷). SoilGrids سیستمی برای نقشه‌برداری خودکار خاک است که بر اساس پیشرفته‌ترین روش‌های پیش‌بینی مکانی است.

- **مدل آنتروپی شانون**

تئوری آنتروپی را نخستین بار آنتروپی شانون به صورت کمی بیان کرد (Shannon, ۲۰۰۱). آنتروپی، یکی از رویکردهای مدیریتی است که به منظور برخورد با، بی‌ثباتی و عدم قطعیت‌های موجود در یک سیستم استفاده می‌شود (Pourghasemi et al, ۲۰۱۲). شاخص آنتروپی مقیاسی از مقدار برابری است که در آن گروه‌ها به طور مساوی و یکنواخت در بین واحدهای سازمانی توزیع شده اند (Massey & Nancy, ۱۹۹۸). رابطه یک به یکی بین کمیت و مقدار آنتروپی سیستم و درجه بی نظمی وجود دارد که اصول بولتزمن نامیده می‌شود، که برای نمایش وضعیت ترمودینامیک یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنتروپی در حقیقت بیانگر آن است که چگونه از بین عوامل موثر یک هدف، می‌توان مهمترین عوامل را تخمین زد یا به عبارتی متغیرهایی که بیشترین تاثیر را در رخداد یک واقعه دارند برای ما مشخص می‌نماید.

در تحقیق حاضر، با استفاده از روش آنتروپی ابتدا نقشه‌های موجود که در مراحل قبل تهیه شدند توسط یکسری فرمول مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور هر نقشه به طور جداگانه به طبقات مختلف تقسیم شدند و با استفاده از فرمول‌ها بررسی لازم روی آن‌ها انجام شد و سپس در مرحله آخر یک ضریب برای هر لایه تهیه گردید. به منظور تهیه نقشه پتانسل آب زیرزمینی روابط زیر با استفاده از مدل آنتروپی شانون انجام گرفت (Al-Abadi et al, ۲۰۱٦; Jafari et al., ۲۰۱۳):

$$P_{ij} = \frac{a}{b}$$ رابطه (۱)

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

$$H_j = -\sum_{i=1}^{S_j}(P_{ij})log_2(P_{ij}).j = 1.\dots.n$$ رابطه (۳)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

$$H_{jmax} = log_2(S_j)$$ رابطه (۴)

$$(P_{ij}) = \frac{p_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} p_{ij}} \,.\, I(0.1).\ j = 1. \dots . n$$ رابطه (۵)

$$W_j = I_j P_{ij}$$ رابطه (۱)

که در آن a و b تعداد پیکسل و تعداد چاه، (P_{ij}) چگالی احتمال (احتمال وجود چاه در هر عامل و کلاس مربوطه) هستند، H_j و H_{jmax} به ترتیب مقدار انتروپی و ماکزیمم انتروپی را نشان می‌دهد، همچنین Ij ضریب اطلاعاتی و Wj مقدار وزن حاصل را برای کلیه عوامل نشان می‌دهد. مقدار W_j بین صفر و یک است که هر چه این ارزش به عدد یک نزدیک باشد حساسیت بیشتر را نشان می‌دهد. مقادیر مربوط به هر عامل در جدول (۱) در بخش نتایج آورده شده است. بعد از اعمال ضرایب مربوط به هر عامل در نرم‌افزار ArcGIS۱۰،۲ نقشه نهایی پتانسل آب زیرزمینی استخراج گردید.

- **مدل جنگل تصادفی (RF)**

در این روش یک سوم داده‌های اصلی در ایجاد هر درخت استفاده نمی‌شوند که تحت عنوان نمونه‌های بیرون از سبد[۷] (OOB) نامیده می‌شوند. چون این نمونه‌ها در آموزش درخت استفاده نشده اند در تست مورد استفاده قرار می‌گیرند و بنابراین نیازی به اعتبار سنجی مستقل در این روش نمی‌باشد. تکنیک RF همچنین اهمیت متغیرها در مدل سازی را نیز تعیین می‌کند. RF به دو روش میانگین کاهش دقت[۸] و میانگین کاهش ضریب جینی[۹] اهمیت متغیرها را نشان می‌دهد. در روش میانگین کاهش دقت که در بیش‌تر مطالعات استفاده شده، مقادیر درست متغیرها با مقادیر که به طور تصادفی برای هر درخت تولید شده است جایگزین می‌شود و اثر این تغییر را روی طبقه بندی اندازه گیری می‌کند، اگر این جایگزینی اثری روی خطای اندازه گیری نداشته باشد اهمیت آن متغیر کم است و اگر مقدار خطای آن اندازه گیری افزایش یابد آن متغیر مهم می‌باشد (Breiman and Cutler, ۲۰۰٤).

هدف از ماشین یادگیری پیدا کردن یک تقریب مفید از تابعی است که اساس آن پیش بینی رابطه بین متغیرهای کمکی ورودی و نتایج مورد نظر است (Hastie et al, ۲۰۰۱). در این مطالعه متغیرهای ورودی کمکی شامل زمین شناسی، کاربری اراضی، پارامترهای کیفی آب زیرزمینی، شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص‌های شوری خاک، مشتقات حاصل از مدل رقومی ارتفاعی، فاصله از معادن، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از نقاط مسکونی، بارندگی و جمعیت می‌باشند و به عنوان متغیر ورودی برای پیش‌بینی شوری، کیفیت، SAR، PH و فلزات سنگین خاک استفاده شدند. اطلاعات خاک و متغیرهای محیطی به فرمت csv تبدیل و برای انجام فرآیند مدلسازی در نرم افزار KNIME Analytics Platform و R آماده شدند.

[۷]. Out of Bag
[۸]. Mean Decrease in Accuracy
[۹]. Mean Decrease in Gini Coefficient

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

نقشه برداری رقومی توسعه یک مدل عددی یا آماری از رابطه بین متغیرهای محیطی و خصوصیات خاک است. برای ایجاد این ارتباط می‌توان از انواع مدل‌ها استفاده نمود. جنگل تصادفی (Random Forest)، یک روش یادگیری ترکیبی برای دسته بندی رگرسیون می‌باشد که پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای را در تکنولوژی داده‌کاوی و علوم خاک ارائه داده است. در الگوریتم RF برای تشکیل هر درخت، دسته متفاوتی از الگوهای موجود با در نظر گرفتن جایگزینی دوباره‌ی هر الگوی انتخاب شده، انتخاب می‌شوند. اندازه این دسته انتخاب شده، برابر تعداد کل الگوهای موجود خواهد بود. RF در سال ۲۰۰۱ توسط برایمن به عنوان یک روشی از توسعه جدید درخت‌های تصمیم‌گیری، ارائه شد که پیش‌بینی چندین الگوریتم منفرد را با هم و با استفاده از قوانین مبتنی ترکیب می‌کند. اصول کلی تکنیک‌های آموزش گروهی بر پایه‌ی این فرض است که دقت آنها از دیگر الگوریتم‌های آموزشی بالاتر است. چون ترکیبی از چند مدل پیش‌بینی، دقیقتر از یک مدل می‌باشد و گروه‌ها در حالی که نقاط ضعف طبقه‌ها را کاهش می‌دهد، همزمان قدرت مجموعه‌های منفرد و منحصر بفرد طبقه‌ها را نیز بیشتر می‌کنند (Kotsiantis and Pintelas, ۲۰۰٤).

رویکرد جنگل تصادفی مبتنی بر روش‌های جدید ترکیب اطلاعات است که در آن تعداد زیادی درخت تصمیم ایجاد گردیده، سپس تمام درختان با هم برای پیش‌بینی ترکیب می‌گردند (Cutler et al., ۲۰۰۷). زمانی که متغیرهای پیشگو و هدف مشخص شدند، جنگل‌های تصادفی با رویاندن یک درخت تصمیم شبیه CART شروع می‌شود. این درخت از چندین لحاظ با درخت CART استاندارد متفاوت است. پارامترهای کلیدی برای مدل جنگل تصادفی، تعداد درختان و تعداد متغیرهای پیشگو می‌باشند. براساس این دو پارامتر، درخت تصمیم به بزرگترین اندازه ممکن رویانده و بدون هرس رها می‌شود (Allouche et al., ۲۰۰٦; Rodriguez-Galiano et al., ۲۰۱۲). برای اجرای مدل جنگل تصادفی از نرم‌افزار R ۳. ۵.۱ و بسته randomforest (Breiman, ۲۰۰۱) استفاده شد.

• واسنجی[۱۰] و اعتبار سنجی[۱۱] مدل

اعتبارسنجی ضربدری (Cross Validation) یکی از مهمترین تکنیک‌هایی است که به طور گسترده توسط دانشمندان علم داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مسائله‌ای که در هنگام کار با مدل‌های یادگیری ماشین (machine learning model) وجود دارد این است که کاربر نمی‌تواند کارایی مدل خود را تا زمانی که کارایی آن را بر روی یک مجموعه داده مستقل تست نکرده است بدست آورید (مجموعه داده‌ای که برای آموزش training مدل یادگیری ماشین مورد استفاده قرار نگرفته باشد). اعتبار سنجی ضربدری برای کمک به تخمین کارایی مدل یادگیری ماشین می‌باشد. اعتبارسنجی ضربدری k-fold یکی از عمومی‌ترین انواع اعتبار سنجی ضربدری می‌باشد که به طور گسترده‌ای در یادگیری ماشین مورد استفاده می‌باشد. اعتبار سنجی ضربدری k-fold با استفاده از گام‌های زیر انجام می‌شود.

- مجموعه داده اصلی را به k زیر مجموعه مساوی تقسیم و هر زیر مجموعه یک fold نامیده می‌شود (f۱, f۲,…., fk).

فولد fi را به عنوان مجموعه اعتبارسنجی در نظر گرفته می‌شود و همه k-۱ فولد باقی مانده را در مجموعه آموزشی اعتبار سنجی ضربدری Cross validating training set نگاه داشته می‌شوند.

۱۰. Calibration
۱۱. Validation

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

۲- مدل یادگیری ماشین خود با استفاده از مجموعه آموزشی اعتبارسنجی ضربدری آموزش داده می‌شود و سپس دقت و کارایی مدل با استفاده از اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی در مقابل مجموعه اعتباسنجی Validation sert محاسبه می‌شود.

۳- دقت و کارایی مدل یادگیری ماشین با استفاده از بدست آوردن میانگین همه دقت‌ها و صحت‌های بدست آمده از همه موارد k از اعتبارسنجی ضربدری تخمین زده می‌شود. در روش اعتبارسنجی ضربدری k-fold، همه ورودی‌ها در مجموعه داده آموزشی برای آموزش و همچنین اعتبارسنجی validating به کار می‌رود، هر ورودی تنها یک بار برای اعتبار سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نکته اینکه معمولا برای k عدد ۱۰ در نظر گرفته می‌شود، اما این یک قانون نیست و k می‌تواند هر عددی در نظر گرفته شود.

- **ارزیابی مدل‌های تهیه نقشه آب زیرزمینی**

جهت ارزیابی کارایی مدل جنگل تصادفی و آنتروپی شانون برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، از شاخص‌های آماری MAE، RMSE و R^2 استفاده شد. روابط ۱ تا ۳ آنها را نشان می‌دهد..

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| X_i - Y_i \right|^2}{n}$$ رابطه ۱

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}$$ رابطه ۲

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X^*_i - Y^*_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}$$ رابطه ۳

که X_i، Y_i، X_i^* و Y_i^* به ترتیب مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌باشد..

شرح و تفسیر نتایج

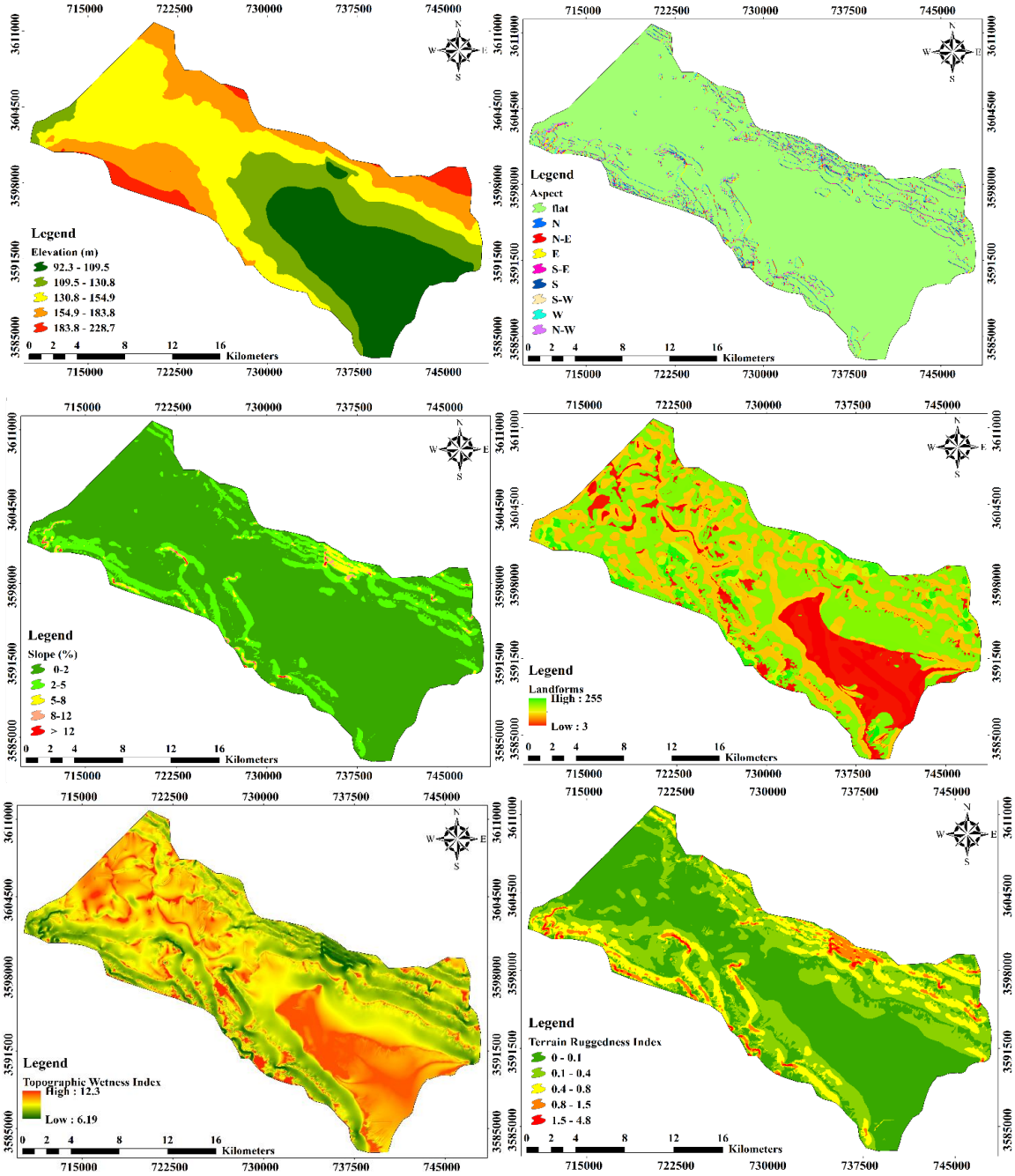
مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری‌ماشین از جدیدترین روش‌های حال حاضر بحساب می‌آید. در این بخش، ابتدا خروجی لایه‌های مورد استفاده در مدل‌ها نمایش داده می‌شود. سپس نتایج مربوط به مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های آنتروپی شانون و جنگل‌تصادفی در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌گردد. همچنین، ارزیابی دقت مدل‌ها به منظور انتخاب مدل برتر نشان داده می‌شود.

- **نقشه‌های رستری**

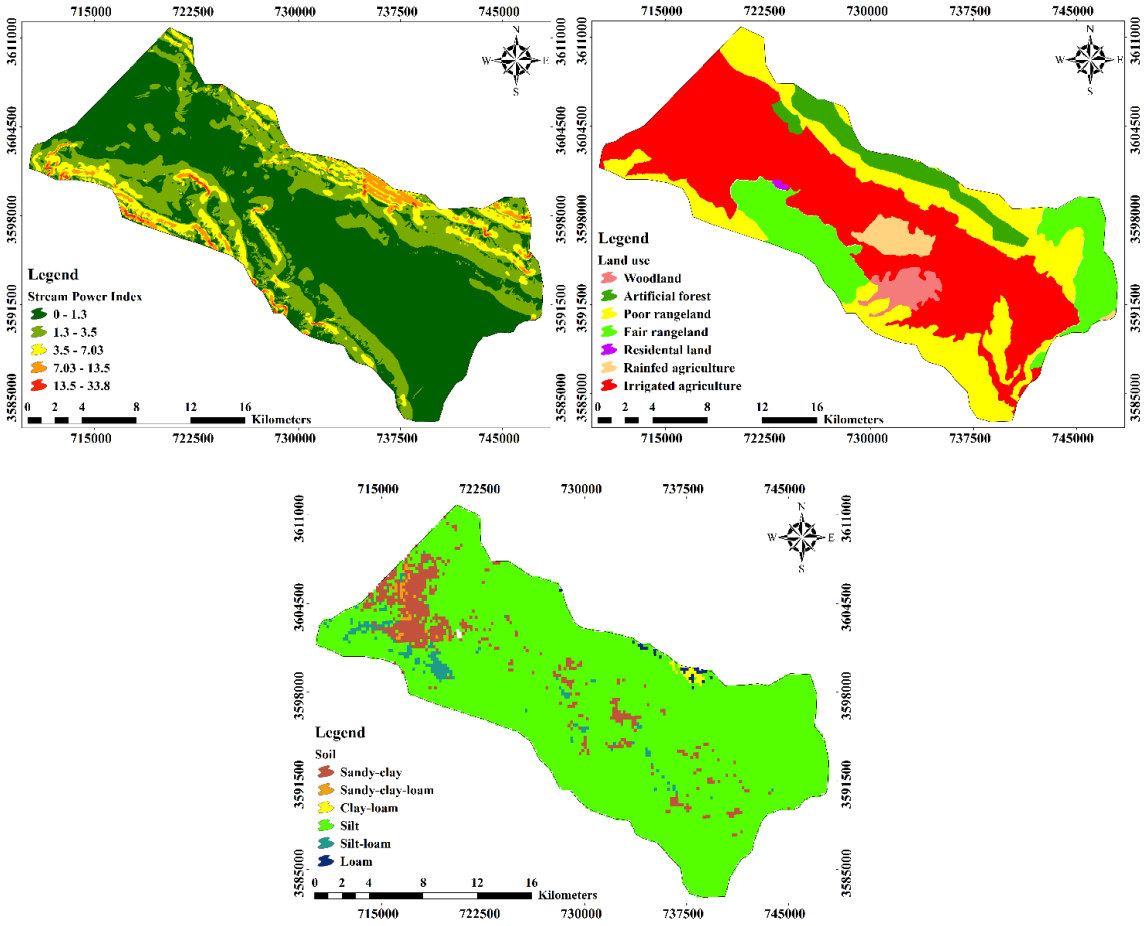
تعداد نه لایه رستری شامل ارتفاع از سطح دریا، جهت شیب، درصد شیب، شکل زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص ناهمواری زمین، شاخص قدرت جریان، کاربری اراضی و خاکشناسی (شکل ۲) برای ورودی مدل‌ها تهیه گردید. نقشه‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

نشان داد که بیشتر منطقه مورد مطالعه، درصد شیب پایین (۲-۰ درصد) و ارتفاع پایین هستند و همچنین از نظر جهت جغرافیایی به منطقه هموار طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۲).



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]



شکل ۲. نقشه لایه‌های مورد استفاده در این تحقیق

مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی در روش آنتروپی ابتدا نقشه‌های موجود که در مراحل قبل تهیه شدند توسط یکسری فرمول مورد بررسی قرار می‌گیرند به اینصورت که هر نقشه به طور جداگانه به طبقات مختلف تقسیم شده و فرمول‌ها روی آن‌ها بررسی انجام می‌دهند و در آخر یک ضریب تهیه می‌گردد (Naghibi et al, ۲۰۱۵، Rahmati et al, ۲۰۱۶، Pourghasemi et al, ۲۰۱۲). در محیط GIS هر یک از ضریب‌های وزن نهایی در نقشه ی مربوط به خود ضرب گردید و در آخر همه ی نقشه‌ها با هم جمع گردید و نقشه ای که بدست آمد همان نقشه پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشد که بر اساس پتانسیل کلاسه بندی گردید (Al-Abadi, Malekian and Azarinvand, ۲۰۱۵ Al-Abadi et al, ۲۰۱; ۲۰۱۵). نتایج حاصل از ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمنی، عوامل مؤثر و حد اثر هر یک از آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج حاصل از ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمینی، عوامل مؤثر و حد اثر هر یک از آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون در جدول (۱) ارائه شده است. براساس نتایج حاصل، طبقه ارتفاعی متوسط (۱۶۰-۱۳۰ متر) بیشترین تعداد چاه (۱۱۴ چاه) را دارد و در طبقه پایین تر تعداد چاه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین تعداد چشمه‌ها در کلاس جهت شیب جنوب است، که نشان دهنده ی زیاد بودن پتانسیل آب زیرزمینی در جهت مذکور می‌باشد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

و کمترین آن در مناطق با جهت جنوب غرب است. بررسی عوامل دیگر نشان داد که بیشترین تعداد وقوع چشمه به ترتیب مربوط به کلاس‌های درجه شیب ۰تا ۲ درجه، طبقه‌ی ۱۰/۱تا ۱۱ از عامل شاخص رطوبت توپوگرافی، طبقه ی ۰تا ۱ از عامل شاخص ناهمواری زمین، خاکشناسی سیلتی، کاربری اراضی زراعت آبی و باغات، زمین شناسی ذخایر تراسی، طبقه ی ۸ تا ۱۸۶ متر و تجمع جریان است.

همچنین براساس نتایج ارائه شده در جدول وزن نهایی هر عامل (Wj) مشخص شد که عوامل خاکشناسی، شکل زمین، شیب، تعادل سلولی، تجمع جریان، کاربری، زمین شناسی، شاخص ناهمواری زمین، شاخص قدرت جریان، گرادیان، شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت شیب، مدل رقومی ارتفاع به ترتیب بیشترین وزن (۰/۹۳۱، ۰/۵۷۷، ۰/۵۲۳، ۰/۲۱۲، ۰/۱۸۸، ۰/۱۵۸، ۰/۱۵۱، ۰/۱۲۷، ۰/۱۱۸، ۰/۰۹۷، ۰/۰۵۵، ۰/۰۴۴، ۰/۰۳۹) را به خود اختصاص داده اند.

جدول ۱- نتایج حاصل از ارتباط بین پتانسیل آب زیرزمنی، عوامل مؤثر و حد اثر هر یک از آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

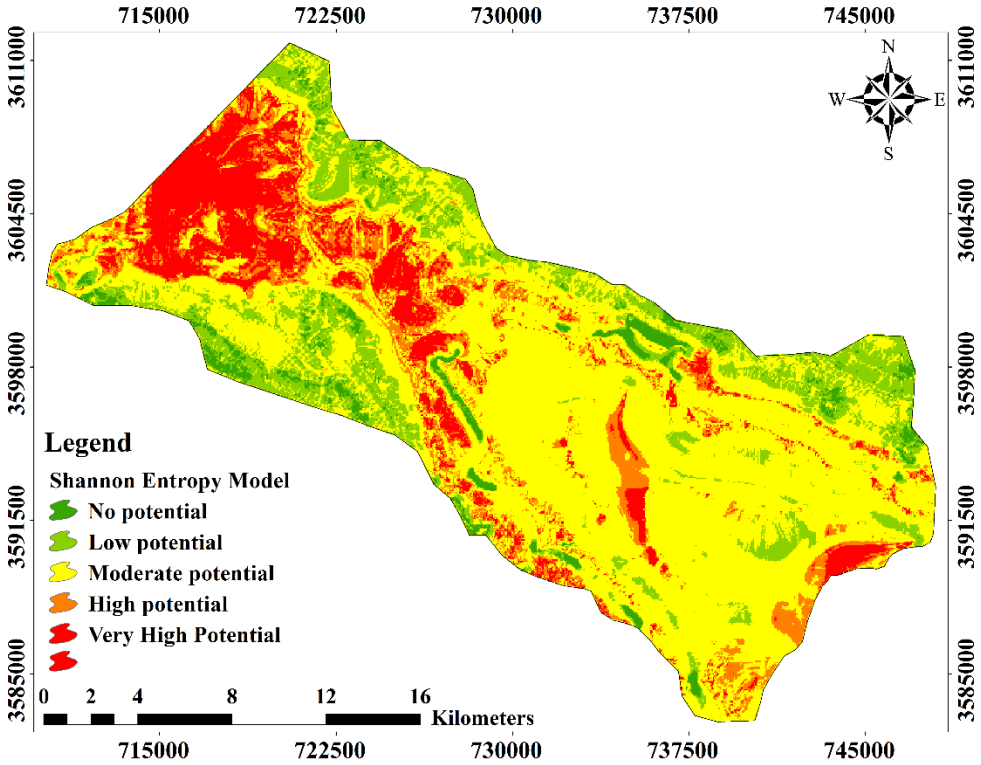
عامل	طبقه	a (تعداد پیکسل)	a(٪)	b (تعداد چاه)	b(٪)	Pij	(Pij)	Hj	Hjmax	Ij	Wij
مدل رقومی ارتفاع	<۱۰۰	۷۳۳۴۴	۰/۱۵	۲۲	۰/۰۹	۰/۶	۰/۱۳	۲/۲۲	۲/۳۲۲	۰/۰۴۴	۰/۰۳۹
	۱۳۰-۱۰۰	۱۲۴۸۵۴	۰/۲۶	۶۱	۰/۲۶	۱	۰/۲۲				
	۱۶۰-۱۳۰	۱۴۹۰۲۷	۰/۳۱	۱۱۴	۰/۴	۱/۲۹	۰/۲۹				
	۱۹۰-۱۶۰	۸۶۵۴۵	۰/۱۹	۳۱	۰/۲۱	۱/۱	۰/۲۴				
	>۱۹۰	۴۳۲۷۲	۰/۰۹	۸	۰/۰۴	۰/۴۴	۰/۰۹				
شیب	۲-۰	۴۵۶۳۸۲	۰/۹۵	۲۰۹	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۱۳	۱/۴۱۷	۲/۳۲۲	۰/۳۸۹	۰/۵۲۳
	۵-۲	۱۷۲۰۸	۰/۰۴	۲۴	۰/۱	۲/۵	۰/۳۸				
	۸-۵	۲۲۵۷	۰/۰۰۶	۳	۰/۰۲	۳/۳	۰/۴۹				
	۱۲-۸	۱۱۰۶	۰/۰۰۳	۰	۰	۰	۰				
	>۱۲	۸۹	۰/۰۰۱	۰	۰	۰	۰				
جهت شیب	شمال	۴۶۱۹۰	۰/۰۹	۳۶	۰/۱۵	۱/۶۶	۰/۱۸	۳/۳	۳/۱۷	۰/۰۴	۰/۰۴۴
	شمال غرب	۶۰۵۹۸	۰/۱۳	۱۱	۰/۰۶	۰/۴۶	۰/۰۶				
	غرب	۴۴۴۷۸	۰/۰۹	۱۴	۰/۰۷	۰/۷	۰/۰۹				
	جنوب غرب	۴۳۸۶۲	۰/۰۹	۱۰	۰/۰۵	۰/۵	۰/۰۶				
	جنوب شرق	۷۹۱۶۰	۰/۱۶	۴۷	۰/۲	۱/۲۵	۰/۱۴				
	جنوب	۸۶۵۷۰	۰/۱۸	۶۰	۰/۲۶	۱/۴	۰/۱۷				
	شرق	۳۵۸۹۷	۰/۰۸	۱۷	۰/۱	۱/۲۵	۰/۱۴				
	شمال شرق	۳۱۵۴۶	۰/۰۸	۱۸	۰/۱۳	۱/۶۲۵	۰/۱۹				
شاخص رطوبت توپوگرافی	۶/۸-۲/۵	۴۰۳۰۵	۰/۰۸	۷	۰/۰۳	۰/۳۷	۰/۰۸	۲/۱۸۱	۲/۳۲۲	۰/۰۶۱	۰/۰۵۵
	۸/۹-۵/۳	۱۱۹۱۹۳	۰/۲۵	۶۰	۰/۲۵	۱	۰/۲۲				
	۹/۱۰-۳/۱	۱۲۵۵۷۰	۰/۲۶	۷۰	۰/۳	۱/۱۵	۰/۲۵				
	۱۰/۱۱-۱	۱۰۴۹۷۴	۰/۲۲	۷۶	۰/۳۲	۱/۴۵	۰/۳۲				
	۱۲-۱۱/۳	۸۷۰۰۰	۰/۱۹	۲۳	۰/۱	۰/۵۲	۰/۱۳				
شاخص ناهمواری زمین	۰ – ۱	۲۴۹۹۱۴	۰/۵۲	۱۳۲	۰/۵۶	۱/۰۷	۰/۳۴	۱/۸۵۶	۲/۳۲۲	۰/۲	۰/۱۲۷
	۲-۱	۱۴۴۶۲۲	۰/۳	۸۲	۰/۳۵	۱/۱۶	۰/۳۶				

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

	۳-۲	۶۳۴۲۷	۰/۱۳	۱۹	۰/۰۸	۰/۶۱	۰/۲				
	۴-۳	۱۵۵۸۸	۰/۰۳	۳	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۱				
	۴-۴/۸	۳۴۹۱	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰				
خاکشناسی	سیلت	۴۵۶۰۱۱	۰/۹۵	۱۸۱	۰/۷۷	۰/۸۱	۰/۰۵	۱/۶۵۲	۲/۵۸۵	۰/۳۶۱	۰/۹۳۱
	شنی رسی	۱۱۵۸۲	۰/۰۲۴	۳۷	۰/۱۶	۶/۶۶	۰/۴۳				
	سیلتی لومی	۴۸۳۴	۰/۰۱	۱۵	۰/۰۶	۶	۰/۳۹				
	شنی رسی لومی	۲۶۸۰	۰/۰۰۵	۳	۰/۰۱	۲	۰/۱۳				
	رسی لومی	۱۲۵۹	۰/۰۰۲	۰	۰	۰	۰				
	لومی	۶۷۶	۰/۰۰۹	۰	۰	۰	۰				
شاخص قدرت جریان	۷-۰	۲۷۷۰۸۲	۰/۵۸	۱۴۷	۰/۶۲	۱/۰۷	۰/۳	۱/۹۳	۲/۳۲۲	۰/۱۷	۰/۱۱۸
	۱۴-۷	۱۳۷۶۷۵	۰/۲۹	۷۶	۰/۳۲	۱/۱	۰/۳				
	۲۱-۱۴	۴۶۴۵۶	۰/۱	۱۰	۰/۰۴۲	۰/۴۲	۰/۱۳				
	۲۸-۲۱	۱۳۸۴۵	۰/۰۲	۳	۰/۰۱۸	۰/۹	۰/۲۷				
	۳۳-۲۸	۱۹۸۴	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰				
شکل زمین	۳-۰	۸۸۹۹۱	۰/۱۹	۲۵	۰/۱	۰/۵۳	۰/۱۸	۰/۶۸	۱/۵۸۵	۰/۵۷۱	۰/۵۷۷
	۱۲۹-۳	۱۷۲۵۷۶	۰/۳۶	۲۱۱	۰/۹	۲/۵	۰/۸۲				
	۲۵۵-۱۲۹	۲۱۵۴۷۵	۰/۴۵	۰	۰	۰	۰				
زمین شناسی	بختیاری	۶۲۸۱	۰/۱۴۶۵	۳۲	۰/۲	۰/۴	۰/۲۵	۰/۸۱۱	۱	۰/۱۸۹	۰/۱۵۱
	آغاجاری	۹۵۴۷	۰/۲۲۲۷	۱۶	۰/۳	۱/۲	۰/۱۵				
	ذخایر تراسی	۲۷۰۴۷	۰/۶۳۰۸	۱۸۸	۰/۷	۲/۸	۰/۶				
تجمع جریان	۱۸۶-۸	۴۷۱۱۷۱	۰/۹۸	۲۳۵	۰/۹۹۶	۱/۰۱۶	۰/۶۴	۰/۹۴۲	۲/۳۲۲	۰/۵۹۴	۰/۱۸۸
	۳۶۴-۱۸۶	۳۷۲۴	۰/۰۰۷	۱	۰/۰۰۴	۰/۵۷۱	۰/۳۶				
	۵۵۱-۳۶۴	۹۶۹	۰/۰۰۷	۰	۰	۰	۰				
	۷۲۹-۵۵۱	۷۰۴	۰/۰۰۵	۰	۰	۰	۰				
	۹۰۰-۷۲۹	۴۷۴	۰/۰۰۱	۰	۰	۰	۰				
تعادل سلولی	<۱	۴۴۵۸۲۰	۰/۹۳	۲۲۵	۰/۹۵	۱/۰۲	۰/۵۵	۰/۹۹۳	۲/۳۲۲	۰/۵۷۲	۰/۲۱۲
	۲-۱	۲۹۳۲۰	۰/۰۶	۱۱	۰/۰۵	۰/۸۳	۰/۴۵				
	۳-۲	۱۳۰۳	۰/۰۰۲	۰	۰	۰	۰				
	۴-۳	۳۰۶	۰/۰۰۴	۰	۰	۰	۰				
	>۴	۲۹۳	۰/۰۰۴	۰	۰	۰	۰				
کاربری اراضی	بیشه زار و درختچه زار	۱۲۶۰۹	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۱/۸۵۶	۲/۸۰۷	۰/۳۳۹	۰/۱۵۸
	زراعت آبی و باغات	۲۹۷۰۰	۰/۰۶	۱۰	۰/۰۴۲	۰/۶۷	۰/۲۰				
	جنگل دست کاشت	۲۳۰۰۰۰	۰/۴۸	۱۷۵	۰/۷۴۱	۱/۵۴	۰/۴۷				
	زراعت دیم	۱۲۸۸۱	۰/۰۲	۱	۰/۰۰۴	۰/۱۴	۰/۰۴				
	مراتع کم متراکم	۱۲۱۹۷۴	۰/۲۵	۴۶	۰/۱۹۵	۰/۷۲	۰/۲۳				
	مراتع نیمه متراکم	۶۸۹۹۸	۰/۱۴	۴	۰/۰۱۸	۰/۱۲	۰/۰۳				
	مناطق مسکونی	۸۸۰	۰/۰۰۴	۰	۰	۰	۰				

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

پس از تعیین وزن پارامترها با روش شاخص آنتروپی و طبقات آن ها، در محیط نرم افزار ArcGIS۱۰،۲ از ترکیب وزن پارامترها و طبقات آن ها نقشه نهایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی حاصل گردید. قسمت اعظمی از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل متوسط می‌باشد و مساحت خیلی اندکی بدون پتانسیل می‌باشد. همچنین مساحت هریک از محدوده‌های دارای پتانسیل مختلف منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل آنتروپی در جدول (۲) آمده شده است.



شکل ۳- نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی توسط مدل آنتروپی شانون

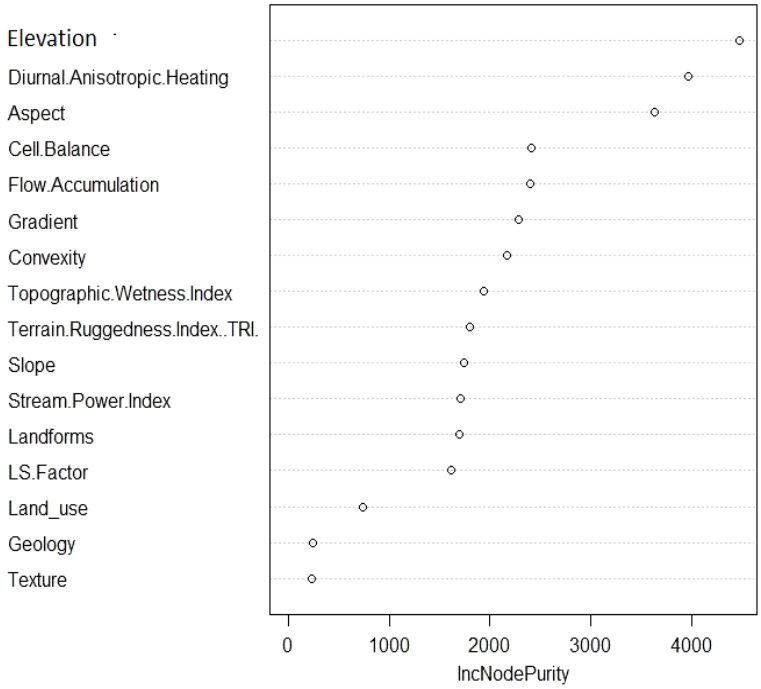
جدول۲- مساحت هریک از محدوده‌های دارای پتانسیل مختلف منطقه مورد مطالعه (مدل آنتروپی شانون)

Potential	Area (ha)
No potential	۱۵۰۲.۱۲
Low potential	۶۳۸۰.۲۰
Moderate potential	۲۴۶۳۳.۰۵
High potential	۵۶۶۷.۰۴
Very High Potential	۴۶۹۲.۶۰

مدل جنگل تصادفی روش دیگری بود که به‌منظور پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی از داده‌های آب زیرزمینی به عنوان متغیر هدف و داده‌های کمکی به عنوان داده پیش‌بینی کننده استفاده شد. در این تحقیق ۱۶ عامل مؤثر شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از گسل، شکل شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، بارندگی، لیتولوژی و کاربری اراضی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

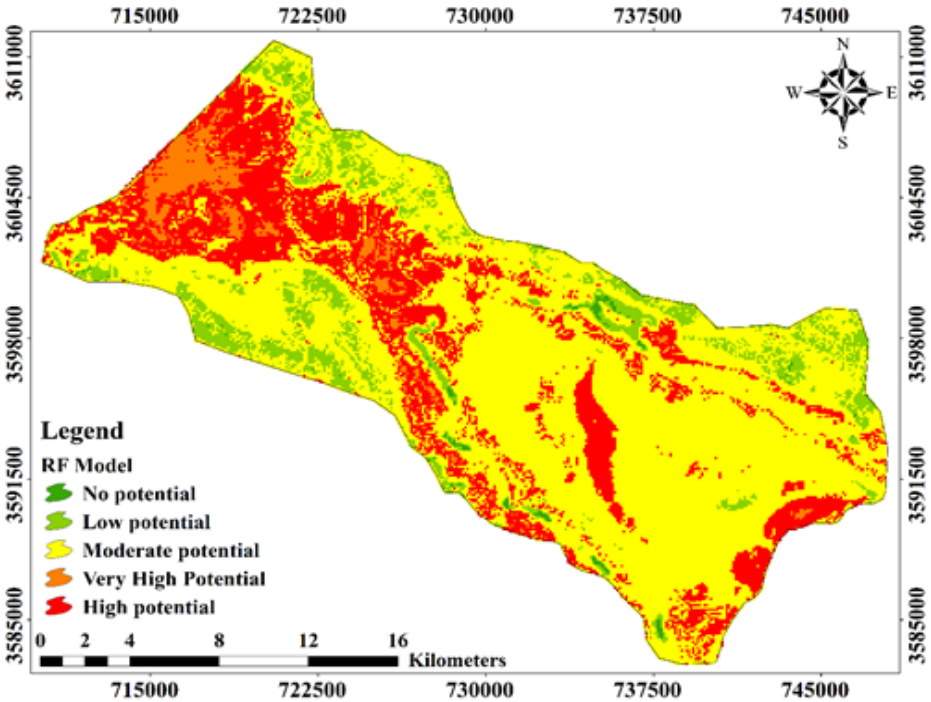
مورد استفاده قرار گرفتند که در پژوهش‌های نقیبی و همکاران (Naghibi et al, ۲۰۱۷) و رحمتی و همکاران (Rahmati et al, ۲۰۱۶) به آن توجه شده است آنالیز حساسیت مدل جنگل تصادفی در شکل (۴) آورده شده است. بر اساس نتایج این مدل عوامل ارتفاع و کاربری اراضی بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی دارند.



شکل ۴-نمودار آنالیز اهمیت عامل مؤثر در مدل جنگل تصادفی به منظور تعیین پتانسیل آب زیرزمینی

پس از تعیین عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه‌ی تحقیق بر اساس مدل جنگل تصادفی تهیه و در شکل (۵) ارائه شده است. همچنین مساحت هریک از محدوده‌های دارای پتانسیل مختلف منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل جنگل تصادفی در جدول (۳) آمده شده است. بر این اساس بخش عظیمی از منطقه دارای پتانسیل متوسط و مساحت اندکی بدون پتانسیل بوده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]



شکل ۵- نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی توسط مدل جنگل تصادفی

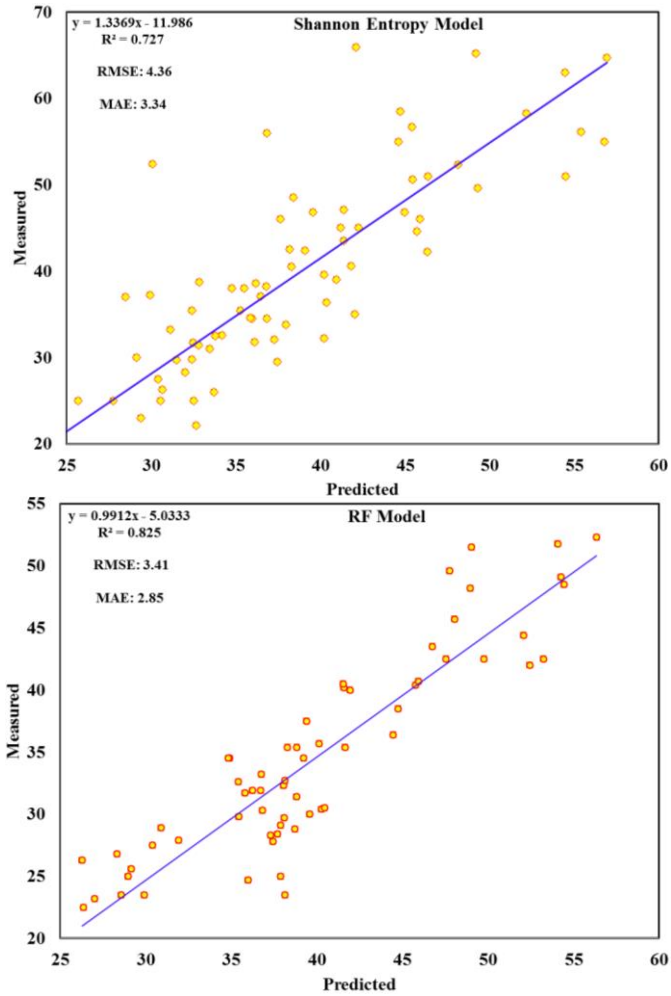
جدول ۳- مساحت هریک از محدوده‌های دارای پتانسیل مختلف منطقه مورد مطالعه (مدل جنگل تصادفی)

Potential	Area (ha)
No potential	۲۰۵.۶۱
Low potential	۳۸۵۷.۴۳
Moderate potential	۲۶۹۵۴.۲۲
High potential	۱۰۱۰۸.۴
Very High Potential	۱۷۳۰.۸۹

- **ارزیابی مدل‌های تهیه نقشه آب زیرزمینی**

نتایج ارزیابی مدل‌های استفاده شده با استفاده از نمودار همبستگی بین مقدار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد شکل (۶). نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی با دقت (R^2 = ۰,۸۲۵, RMSE: ۳,٤۱, MAE: ۲,۸۵) دارای دقت بهتری نسبت به مدل آنتروپی شانون با دقت (R^2 = ۰,۷۲۷, RMSE: ٤,۳٦, MAE: ۳,۳٤) می‌باشد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]



شکل ۶- نتایج ارزیابی مدل‌های جنگل تصادفی و آنتروپی شانون در تهیه نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی

ارزیابی و اولویت بندی عوامل موثر روی اکوسیستم‌های طبیعی برای مدیریت و استفاده پایدار از منابع آب و زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بهره‌برداری از آن‌ها به سرعت در حال تغییر است، ضروری است (Al-Abadi et al., ۲۰۱٦; Yaghobi et al., ۲۰۱۹). نتایج نشان داد که مدل مدل جنگل تصادفی (RF) صحت بالایی جهت پتانسیل یابی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه دارد. مدل جنگل تصادفی که از مدل‌های برتر یادگیری ماشین است در مطالعات مختلف جز مدل‌های با صحت بالا برای مدل‌سازی مطالعات محیطی به حساب می‌اید (Al-Abadi et al., ۲۰۱٦; Breiman, ۲۰۰۱, Breiman et al. ۲۰۰٤; Cutler et a., ۲۰۰۷; Thanh et al., ۲۰۲۳; Madani and Niyazi, ۲۰۲۳). همچنین در مطالعه حاضر، دقت مدل جنگل تصادفی توسط نمودار همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده تعیین گردید، که مقدار آن معادل ($R^۲$=۰٫۸۲) می‌باشد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی مدل جنگل تصادفی مشخص شد که بیشترین مساحت حساسیت در کلاس پتانسیل متوسط می‌باشد (۶۲/۹۳٪) و کلاس بدون پتانسیل کمترین مساحت را در برگفته است (۰/۴۸٪). این نتایج نشان دهنده پتانسیل نسبتا بالای سفره‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این در حالیست که برخی مناطق پتانسل خیلی پایین و پایینی برای سفره‌های آب زیرزمینی دارند (Al-

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]
[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

(Abadi et al., ۲۰۱٦). در این تحقیق از بین تمامی عوامل مؤثر که شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از گسل، شکل شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، بارندگی، لیتولوژی و کاربری اراضی می‌باشد، عوامل ارتفاع و کاربری اراضی بر اساس مدل جنگل تصادفی بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی دارند. در پژوهش‌های قبلی مانند نقیبی و همکاران (Naghibi et al, ۲۰۱۷) و رحمتی و همکاران (Rahmati et al, ۲۰۱٦) بیشتر این عوامل برای در آنالیز حساسیت مدل جنگل تصادفی بکار برده شده است. در مطالعه حاضر، بر اساس نتایج مدل جنگل تصادفی عوامل ارتفاع از سطح دریا، کاربری اراضی و جهت شیب بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه دارند. در تحقیقی که توسط رضوی ترمه و همکاران (Razavi-Termeh et al., ۲۰۱۹) انجام گرفت، نتایج مدل جنگل تصادفی نشان داد که پارامترهای فاصله از رودخانه و جهت شیب مهمترین عوامل موثر روی پتانسیل آب زیرزمینی بودند.

در تحقیق حاضر، مدل آنتروپی شانون نیز برای نقشه نهایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی بر اساس وزن پارامترها مختلف استفاده گردید. نتایج این مدل نشان داد که حدود ۵۷/۴۵ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل متوسط می‌باشد و مساحت بدون پتانسیل حدود ۳/۵ درصد می‌باشد. اگرچه، در مطالعه حاضر مدل آنتروپی شانون صحت کمتری نسبت به مدل جنگل تصادفی نشان داد اما در برخی مطالعات دیگر ترکیب مدل آنتروپی شنون با مدل‌های دیگر مانند الگوریتم پشتیبانی تصمیم نیز دارای صحت قابل قبولی بود (Halder et al., ۲۰۲۳).

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، از الگوریتم‌های یادگیری‌ماشین شامل آنتروپی شانون و جنگل تصادفی برای مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی در مراتع خشک غرب ایران استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان داد که روش جنگل تصادفی (RMSE: ۲.۸۵ ,MAE: ۳.۴۱ ,R^2 = ۰,۸۲۵) دارای دقت بالاتری نسبت به مدل آنتروپی شانون (,RMSE: ٤,۳٦ ,R^2 = ۰,۷۲۷ MAE: ۳,۳٤) می‌باشد. نقشه تهیه شده با استفاده از مدل جنگل تصادفی نشان داد که بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه مربوط به پتانسیل منابع آب زیرمینی در کلاس متوسط می‌باشد (۶۲/۹۳٪) و کلاس بدون پتانسیل کمترین مساحت را در برگفته است (۰/۴۸٪). همچنین، بر اساس نتایج این مدل عوامل ارتفاع و کاربری اراضی بیشترین تاثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی دارند. الگوریتم جنگل تصادفی با انعطاف‌پذیری فوق‌العاده برای تحلیل وقایع طبیعی، قادر است ابهامات ایجاد شده در ذهن انسان، محیط و عدم قطعیتی که همواره در قضاوت انسان وجود دارد مدلسازی و تحلیل نماید. لذا نتایج حاصل، توجه مدیران و مسئولان امر در اتخاذ تصمیمات آتی مدیریت منابع آب و همچنین بهره‌برداری از آنها در منطقه مورد مطالعه را می‌طلبد.

منابع

Abd Manap, M., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A. and Ramli, M.F. ۲۰۱٤. Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, ***7*(۲)**: ۷۱۱-۷۲٤.

Al-Abadi, A.M. ۲۰۱۷. Modeling of groundwater productivity in northeastern Wasit Governorate, Iraq using frequency ratio and Shannon's entropy models. *Applied Water Science*, ***7*(۲)**: ٦۹۹-۷۱٦.

Al-Abadi, A.M., Al-Temmeme, A.A. and Al-Ghanimy, M.A. ۲۰۱٦. A GIS-based combining of frequency ratio and index of entropy approaches for mapping groundwater availability zones at Badra–Al Al-Gharbi–Teeb areas, Iraq. *Sustainable Water Resources Management*, ***2*(۳)**: ۲٦٥-۲۸۳.

Allouche, O., Tsoar, A. and Kadmon, R. ۲۰۰٦. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology*, ***43*(٦)**: ۱۲۲۳-۱۲۳۲.

Breiman, L. and Cutler, A. ۲۰۰٤. Random Forests, URL: http://www. stat. berkeley. edu/users/breiman. *RandomForests/cc_papers. htm*.

Breiman, L. ۲۰۰۱. Random forests. *Machine learning*, ***45*(۱)**: ٥-۳۲.

Cutler, D.R., Edwards Jr, T.C., Beard, K.H., Cutler, A., Hess, K.T., Gibson, J. and Lawler, J.J. ۲۰۰۷. Random forests for classification in ecology. *Ecology*, ***88*(۱۱)**: ۲۷۸۳-۲۷۹۲.

De Martonne, E. M. ۱۹۲٦. L'indice d'aridité. *Bulletin de l'Association de géographes français*, ***3*(۹)**: ۳-٥.

Friedman, J., Hastie, T. and Tibshirani, R., ۲۰۱۰. Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent. *Journal of statistical software*, ***33*(۱)**: ۱.

Ganapuram, S., Kumar, G.V., Krishna, I.M., Kahya, E. and Demirel, M.C. ۲۰۰۹. Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Advances in Engineering Software*, ***40*(۷)**: ٥۰٦-٥۱۸.

Halder, S., Roy, M. B., & Roy, P. K. ۲۰۲۰. Analysis of groundwater level trend and groundwater drought using Standard Groundwater Level Index: A case study of an eastern river basin of West Bengal, India. *SN Applied Sciences*, ***2*(۳)**: ۱-۲٤.

Halder, S., Roy, M. B., Roy, P. K., & Sedighi, M. (۲۰۲۳). Groundwater vulnerability assessment for drinking water suitability using Fuzzy Shannon Entropy model in a semi-arid river basin. *Catena*, ***229***, ۱۰۷۲۰٦.

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B. and Guevara, M.A. ۲۰۱۷. SoilGrids۲٥۰m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, ***12*(۲)**: e۰۱٦۹۷٤۸.

Hou, E., Wang, J. and Chen, W. ۲۰۱۸. A comparative study on groundwater spring potential analysis based on statistical index, index of entropy and certainty factors models. *Geocarto international*, ***33*(۷)**: ۷٥٤-۷٦۹.

Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian, J., & Sattarian, A. ۲۰۱٤. 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*, ۱۱: ۹۰۹-۹۲٦.

Jothibasu, A. and Anbazhagan, S. ۲۰۱٦. Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River basin of South India using analytic hierarchy process. *Modeling Earth Systems and Environment*, ***2*(۳)**: ۱۰۹.

Khoshtinat, S., Aminnejad, B., Hassanzadeh, Y. and Ahmadi, H. ۲۰۱۹. Application of GIS-based models of weights of evidence, weighting factor, and statistical index in spatial modeling of groundwater. *Journal of Hydroinformatics*, ***21*(٥)**: ۷٤٥-۷٦۰.

Madani, A., & Niyazi, B. (۲۰۲۳). Groundwater Potential Mapping Using Remote Sensing and Random Forest Machine Learning Model: A Case Study from Lower Part of Wadi Yalamlam, Western Saudi Arabia. *Sustainability*, ***15*(۳)**, ۲۷۷۲.

Malekian, A. and Azarnivand, A. ۲۰۱٦. Application of integrated Shannon's entropy and VIKOR techniques in prioritization of flood risk in the Shemshak watershed, Iran. *Water Resources Management*, ***30*(۱)**: ٤۰۹-٤۲٥.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

Massey, D.S. and Denton, N.A., ۱۹۸۸. The dimensions of residential segregation. *Social forces*, ***67*(۲)**:۲۸۱-۳۱۵.

Moghaddam, D.D., Rezaei, M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghie, Z.S. and Pradhan, B. ۲۰۱۵. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, ***8*(۲)**: ۹۱۳-۹۲۹.

Molden, D. (۲۰۱۳). *Water for food water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*: Routledge.

Naghibi, S. A., Ahmadi, K. and Daneshi, A. ۲۰۱۷. Application of support vector machine, random forest, and genetic algorithm optimized random forest models in groundwater potential mapping. *Water Resources Management*, ***31*(۹)**: ۲۷۶۱-۲۷۷۵.

Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R. and Dixon, B. ۲۰۱۶. GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental monitoring and assessment*, ***188*(۱)**: ٤٤.

Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S. and Rezaei, A. ۲۰۱۵. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics*, ***8*(۱)**: ۱۷۱-۱۸٦.

Nampak, H., Pradhan, B. and Abd Manap, M. ۲۰۱٤. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, **٥١٣**: ۲۸۳-۳۰۰.

Nhu, V.H., Rahmati, O., Falah, F., Shojaei, S., Al-Ansari, N., Shahabi, H., Shirzadi, A., Górski, K., Nguyen, H. and Ahmad, B.B. ۲۰۲۰. Mapping of Groundwater Spring Potential in Karst Aquifer System Using Novel Ensemble Bivariate and Multivariate Models. *Water*, ***12*(٤)**: ۹۸٥.

Oh, H.J., Kim, Y.S., Choi, J.K., Park, E. and Lee, S. ۲۰۱۱. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, ***399*(۳-٤)**: ۱٥۸-۱۷۲.

Ozdemir, A. ۲۰۱۱. 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*(۳-٤)**: ۲۹۰-۳۰۸.

Pande, C. B., Moharir, K. N., Panneerselvam, B., Singh, S. K., Elbeltagi, A., Pham, Q. B., ... & Rajesh, J. ۲۰۲۱. Delineation of groundwater potential zones for sustainable development and planning using analytical hierarchy process (AHP), and MIF techniques. *Applied Water Science*, ***11*(۱۲)**, ۱۸٦.

Pourghasemi, H.R., Mohammady, M. and Pradhan, B. ۲۰۱۲. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, **۹۷**: ۷۱-۸٤.

Pourtaghi, Z.S. and Pourghasemi, H.R. ۲۰۱٤. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, ***22*(۳)**: ٦٤۳-٦٦۲.

Pradhan, B. (۲۰۰۹). Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Open Geosciences*, ***1*(۱)**: ۱۲۰-۱۲۹.

Rahmati, O., Pourghasemi, H.R. and Melesse, A.M. ۲۰۱٦. 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***:۳٦۰-۳۷۲.

Razavi-Termeh, S. V., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S. M. (۲۰۱۹). Groundwater potential mapping using an integrated ensemble of three bivariate statistical models with random forest and logistic model tree models. *Water*, ***11*(۸)**: ۱٥۹٦.

Rodriguez-Galiano, V.F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M. and Rigol-Sanchez, J.P. ۲۰۱۲. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ٦۷: ۹۳-۱۰٤.

Shannon, C.E., ۲۰۰۱. A mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, ***5*(۱)**:۳-٥٥.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]

Thanh, N. N., Chotpantarat, S., Ha, N. T., & Trung, N. H. (۲۰۲۳). Determination of conditioning factors for mapping nickel contamination susceptibility in groundwater in Kanchanaburi Province, Thailand, using random forest and maximum entropy. *Environmental Geochemistry and Health*, ۱-۲۰.

Tien Bui, D., Le, K.T.T., Nguyen, V.C., Le, H.D. and Revhaug, I. ۲۰۱٦. Tropical forest fire susceptibility mapping at the Cat Ba National Park Area, Hai Phong City, Vietnam, using GIS-based kernel logistic regression. *Remote Sensing*, ***8*(٤)**: ۳٤۷.

Tweed, S.O., Leblanc, M., Webb, J.A. and Lubczynski, M.W. ۲۰۰۷. Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. *Hydrogeology Journal*, ***15*(۱)**: ۷۵-۹٦.

Yaghobi, S., Faramarzi, M., Karimi, H., & Sarvarian, J. ۲۰۱۹. Simulation of land-use changes in relation to changes of groundwater level in arid rangeland in western Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, ***16*(۳)**: ۱٦۳۷-۱٦٤۸.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1402.10.3.10.7]

[DOI: 10.61186/jsaeh.10.3.163]