



دوره ۳۵، شماره ۱، شماره ۱ پیاپی ۱۳۴، بهار ۱۴۰۱، صفحه‌های ۸۷-۷۳
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.354418.1407

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

شبیه‌سازی مکانی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی آبخیز تلوار با مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی

ادریس سیفی سلسله

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، ایران

محمدصدیق قربانی

(نویسنده‌ی مسئول)* استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، ایران

نگین عالی

استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: 1978@ms.ghorbani@gmail.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۹ شهریور ۱۴۰۰

چکیده

در این پژوهش ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی بخش‌های گوناگون آبخیز تلوار با دو مدل یادگیری ماشینی بردار پشتیبان و جنگل تصادفی شناسایی شد. اطلاعات چاه‌های منطقه از شرکت آب منطقه‌ی کردستان گرفته شد. چاه‌های موجود در منطقه به‌شیوه‌ی تصادفی به دو گروه آموزش (۷۰٪ از داده‌ها) و اعتبارسنجی (۳۰٪ از داده‌ها) تقسیم شد. عامل‌های ارتفاع، شیب زمین، جهت شیب، سنگ‌شناسی، خاک‌شناسی، انحنای سطح، کاربری زمین، شاخص رطوبت پستی و بلندی و فاصله از رود متغیرهای پیش‌بینی‌کننده انتخاب، و نقشه‌ی آن‌ها در سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. داده‌های گروه آموزش به همراه نقشه‌های متغیرهای پیش‌بینی‌کننده به مدل ماشین بردار پشتیبان و مدل جنگل تصادفی وارد کرده شد. متغیرهای مدل برپایه‌ی داده‌های گروه آموزش تنظیم شد، و برپایه‌ی آن توان اندوخته‌های آب زیرزمینی پیش‌بینی شد. دقت پیش‌بینی مدل‌ها با روش آماری منحنی مشخصه‌ی عمل کرد در دو مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی تعیین شد. نتیجه‌ها نشان داد که دقت مدل جنگل تصادفی (۹۸/۴٪) بیش‌تر از ماشین بردار پشتیبان (۹۸/۱٪) است.

واژگان کلیدی: آبخیز تلوار، آب زیرزمینی، سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، شبیه‌سازی

مقدمه

عمده و تنها منبع مطمئن و دائمی تأمین آب در منطقه‌های خشک و نیمه خشک و کویری، به‌ویژه در خشک‌سالی، اندوخته‌های آب زیرزمینی است. از این اندوخته‌ها از مدت‌ها پیش با قنات، و در دهه‌های اخیر با رشد و توسعه فن‌آوری حفاری، با چاه‌های نیمه‌ژرف و ژرف بهره‌برداری، و گاهی به آن تهاجم شده است (حسامی ۲۰۱۶). تقریباً ۸۵٪ از مساحت کشور از نظر اقلیمی، نیمه‌خشک، خشک و فراخشک است. میانگین بارش سالانه‌ی کشور ۲۶۰-۲۴۰ میلی‌متر است. میانگین بارش جهانی در حدود ۸۷۰ میلی‌متر است و بارش ایران در حدود یک سوم آن است. از جانب دیگر، پراکنش بارندگی در ایران از دید مکانی و زمانی یکنواخت نیست (علیزاده ۲۰۰۳). بارندگی بیش‌تر از ۱۰۰۰ میلی‌متر تنها ۱٪، و بارندگی کم‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر ۲۸٪ از سطح کشور را پوشش می‌دهد. بیش‌تر از نیمی از اندوخته‌های آب تجدیدپذیر تنها در یک سوم کشور است (غفوری ۲۰۰۸). پژوهش‌های آب زیرزمینی با هدف‌هایی مانند بررسی وضعیت فعلی اندوخته‌های آب زیرزمینی، تعیین توان موجود آب زیرزمینی از محاسبه‌ی تراز آب زیرزمینی، پیش‌بینی تغییر تراز آب زیرزمینی در دوره‌ی آینده و امکان برنامه‌ریزی و مدیریت اندوخته‌های آب برای بهبود شرایط آبخوان در آینده انجام می‌شود (انصاری و همکاران ۲۰۱۱).

اولین گام در بهره‌گیری صحیح از اندوخته‌های آب زیرزمینی شناخت ظرفیت ذخیره و بهره‌برداری آب زیرزمینی آبخوان‌ها است. بنابراین جمع‌آوری اطلاعات در باره‌ی منطقه‌های با ظرفیت استخراج آب زیرزمینی ممکن است آب بیش‌تر و باکیفیت بهتر را به‌دست دهد. در دو دهه‌ی گذشته پژوهش‌های گوناگونی با رویکردهای گوناگون برای بررسی توان آب زیرزمینی در دشت‌های گوناگون ایران انجام شده است، از جمله بررسی روند ظرفیت آب زیرزمینی در دشت هشتگرد (احتشامی و همکاران ۲۰۰۲)، دشت‌های نیشابور (خاشعی سیوکی و همکاران ۲۰۱۱)، شهرکرد (رحیمی ۲۰۱۲)، دشت تبریز (رضایی مقدم و همکاران ۲۰۱۶)، و حوزه‌ی شمالی ایلام (عباسی و حیدری ۲۰۱۷). این بررسی‌ها در سال‌های اخیر با رویکردهای جدیدتر و بهره‌گیری از مدل‌های نرم‌افزاری دنبال شده است. بهره‌گیری مدل‌های نرم‌افزاری ممکن است هزینه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی را کاهش دهد. این مدل‌ها طیف گسترده‌ی از روش‌ها از جمله تهیه‌ی نقشه‌ی ظرفیت آب‌های زیرزمینی با شبکه‌ی عصبی پیچشی و وایازی بردار پشتیبان، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی، الگوریتم C5.0 و مدل‌های جی‌آی‌اس محور و سنجش از دور (چوبین و رحمتی ۲۰۲۱، پناهی و همکاران ۲۰۲۰، نقیعی و همکاران ۲۰۱۷، گلکاریان و همکاران ۲۰۱۸، آندوالم

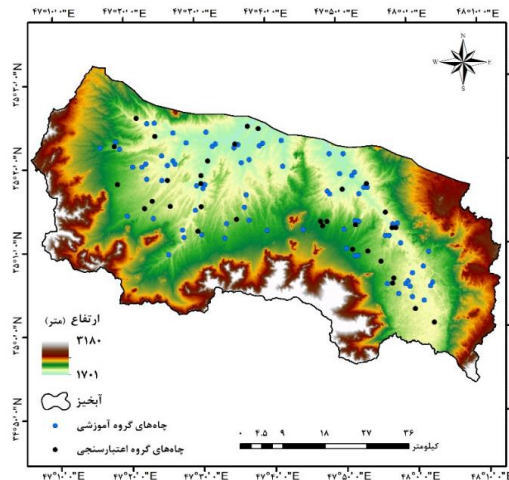
و دمک ۲۰۱۹)، مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی محاسبه‌ی و یادگیری ماشین (فام و همکاران ۲۰۱۹، جعفرزاده ۲۰۲۱، موسوی و همکاران ۲۰۲۱)، مدل‌های آماری و داده‌کاوی (عرب عامری و همکاران ۲۰۱۹، کردستانی و همکاران ۲۰۱۸)، و روش طبقه‌بندی و درخت وایازی (چوبین و همکاران ۲۰۱۹) است.

مدل ماشین بردار پشتیبان از روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده‌ی تصویرهای سنجش از دور، و مبتنی بر نظریه‌ی یادگیری آماری است. این مدل از جمله روش‌های توان‌مند در طبقه‌بندی تصویرهای فرا طیفی است (جنسون ۲۰۱۵) که به‌دلیل بازده بسیار خوب با نمونه‌های محدود، و طبقه‌بندی کردن با دقت بسیار زیاد نسبت به روش‌های عام و سنتی، به شکل جامع و گسترده در سنجش از دور به کار گرفته می‌شود (مونتراکیس و همکاران ۲۰۱۱). جنگل تصادفی یکی از روش‌هایی است که از الگوریتم‌های پایه برای بررسی و طبقه‌بندی داده با دقت زیاد بهره می‌گیرد (فریدل و همکاران ۱۹۹۹، برایمن ۲۰۰۱). مدل جنگل تصادفی در بررسی پوشش زمین بسیار کاربردی است (پال ۲۰۰۵). این دو روش دقتی پذیرفتنی در پیش‌بینی اندوخته‌های آب زیرزمینی دارد.

در این پژوهش ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی در آبخیز تلوار در شرق استان کردستان بررسی شد. بیش‌تر آبخیز تلوار دشت‌های وسیع قروه و دهگلان است. تحلیل بخش‌های اقلیمی، و بررسی اثر دراز مدت خشک‌سالی و مقدار برداشت نشان می‌دهد که تراز آبخوان‌ها در این ناحیه افت چشم‌گیری کرده است (خوشحال و همکاران ۲۰۱۲، عطایی و همکاران ۲۰۱۲). پهنه‌بندی ظرفیت آب زیرزمینی در دشت دهگلان بیان‌گر آن است که ظرفیت آبی نهشته‌های ضخیم لایه‌ی دوران چهارم به ویژه در اطراف آب‌راه‌های اصلی زیاد است (رحیمی و سلیمانی ۲۰۱۷). هدف از این پژوهش ارزیابی کردن اندازه‌ی کارآیی مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی در شناسایی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی آبخیز تلوار است.

مواد و روش‌ها

زیرحوزه‌ی تلوار-مهرآباد در بخش جنوبی آبخیز سد سفیدرود میان طول جغرافیایی "۲۶' ۴۷" و "۴۷' ۱۴' ۴۸" شرقی و عرض جغرافیایی "۲۵' ۵۱' ۳۵" و "۳۱' ۱' ۳۵" شمالی، در شرقی استان کردستان است. وسعت کل محدوده‌ی پژوهشی ۷۲۸۴ km² است که ۵۷۰۹ km² آن بلندی‌ها و ۱۵۷۵ km² آن دشت است. آبخوان آبرفتی دشت قروه-دهگلان از نوع آزاد با مساحت ۱۲۴۵ km² و ۷۹٪ از کل وسعت دشت‌های منطقه است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه.

زیرزمینی است و بر عامل‌هایی مانند فرآیندهای آب‌شناختی آبخیزها و شرایط مناسب برای نفوذ روان‌آب‌های سطحی تاثیرگذار است.

برای تهیه و بررسی نقشه‌ی ارتفاع منطقه از مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۱۲ متری) در نرم افزار آرک جی‌آی‌اس بهره گرفته شد. انحنا و شکل زمین تأثیر بسیار زیادی در پایداری زمین‌های شیب‌دار دارد و مانند سطح تمرکز یا پراکندگی کار می‌کند، و عامل تعیین‌کننده‌ی برای آب زیرزمینی در چشم‌انداز است. سه طبقه‌ی شکل مقعر، زمین‌های تخت و شکل محدب دارد. برای تهیه و بررسی نقشه‌ی انحنا از سطح زمین از مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۱۲ متری) بهره گرفته شد، و در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس با عنوان تابع انحنا تهیه شد. مقدار شیب بیان‌گر زاویه‌ی هر قسمت از سطح زمین از سطح مینا، و بازگوکننده‌ی حرکت سنگ‌ها، جریان آب و مواد دیگر روی شیب است.

برای پدید آوردن و بررسی نقشه‌ی شیب منطقه از مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۱۲ متری) بهره گرفته و در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس با عنوان تابع شیب تهیه شد. جهت شیب، جهت بیشینه‌ی شیب سطح زمین است. مقدار جهت شیب از ۰ تا ۳۳۰ درجه متغیر است، و معمولاً در نه طبقه‌ی شمال، شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، جنوب، جنوب غربی، غرب، شمال غربی و مسطح طبقه‌بندی می‌شود. برای پدید آوردن و بررسی نقشه‌ی جهت شیب منطقه مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۱۲ متری) بهره گرفته و در آرک جی‌آی‌اس با عنوان نما (Aspect) تهیه شد.

برای پدید آوردن و بررسی نقشه‌ی فاصله از رود لایه‌ی رقومی رودهای منطقه و تابع فاصله در آرک جی‌آی‌اس به‌کاربرده شد.

موقعیت مکانی چاه‌های منطقه گرفته (پایگاه داده‌ی شرکت آب منطقه‌ی استان کردستان) و به سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی برده شد. چاه‌ها به شیوه‌ی تصادفی به دو گروه آموزشی (۷۰٪ داده‌ها) و اعتبارسنجی (۳۰٪ داده‌ها) تقسیم کرده شد. در فرآیند شبیه‌سازی، از گروه آموزشی برای ساخت مدل و بهینه‌سازی آن بهره گرفته می‌شود. گروه اعتبارسنجی در ساخت مدل به‌کار نمی‌رود، و برای تعیین دقت مدل بعد از به‌دست آمدن نتیجه‌های شبیه‌سازی، در مرحله‌ی ارزیابی دقت پیش‌بینی به‌کار گرفته می‌شود.

لایه‌های متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) در سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. نقشه‌ی سنگ‌شناسی از نقشه‌ی زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج و در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس تهیه شد. نقشه‌ی طبقه‌های خاک (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) بر پایه‌ی پژوهش‌های خاک‌شناسی (اداره‌ی جهاد کشاورزی استان کردستان) تهیه شد.

خاک تأثیر زیادی بر نفوذپذیری لایه‌های سطحی زمین دارد. نقشه‌ی شاخص رطوبت پستی و بلندی که شاخصی ترکیبی از وضعیت شیب و مساحت بالادست هر جا است، و متغیر پستی‌بلندی آب‌شناختی دانسته می‌شود بر پایه‌ی مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار ساگا جی‌آی‌اس تهیه شد. نقشه‌ی کاربری زمین از پر اهمیت‌ترین عامل‌های تاثیرگذار در ظرفیت آب آبخیز است.

نقشه‌ی کاربری زمین بر پایه‌ی اصلاح کردن نقشه‌ی کاربری موجود (پایگاه اطلاعات مکانی اداره‌ی جهاد کشاورزی استان کردستان) و رقومی‌سازی پدید آورده و طبقه‌بندی شد، که نشان می‌دهد کاربری هر بخش از منطقه چه است. ارتفاع یکی از عامل‌های بسیار اثرگذار برای تهیه‌ی نقشه‌ی ظرفیت آب

داده‌های آموزش کنار گذاشته می‌شود (داده‌های بیرون از کیسه).

مدل جنگل تصادفی ساختار ناسنجی دارد که فضای لازم را برای تجزیه و تحلیل پدیده‌های پیچیده (مانند پدیده‌های طبیعی) فراهم می‌کند. این مدل می‌تواند علاوه بر پیش‌بینی مکانی پدیده‌های طبیعی، اندازه‌ی اهمیت متغیرهای مستقل را تعیین کند. این کار موجب توسعه‌یافتن دانش و شناختن بیش‌تر رابطه‌های میان عامل‌های محیطی و پدیده‌های طبیعی می‌شود.

منحنی مشخصه‌ی عامل‌های گیرنده (ROC) روشی مفید برای تعیین کیفیت تشخیص و پیش‌بینی سامانه‌های قطعی و احتمالی است. این روش به دلیل دادن نتیجه‌های اعتبارسنجی به ارزش نموداری و کمی، یکی از رایج‌ترین روش‌های جهانی است.

نقطه‌های تشکیل‌دهنده‌ی این منحنی برپایه‌ی اندازه‌های دو معیار حساسیت (S) و ویژگی (Sp) تعریف شد، به طوری که محور افقی آن S و محور عمودی آن Sp بود (فاست ۲۰۰۶). نرم‌افزارهای آماری برای رسم منحنی‌های مشخصه‌ی عامل‌های گیرنده با این فرض که توزیع داده‌ها به شکل دومه (یعنی دو توزیع بهنجار یکی برای نتایج مثبت و دیگری برای نتایج منفی) است، روش بیش‌ترین شباهت را به کار می‌برند، که منحنی رسم شده‌ی آن مربوط به همه‌ی نقطه‌های برش ممکن است. هر چه منحنی به بالا و چپ نزدیک‌تر باشد کارایی آن بیش‌تر است.

چندین شاخص برای ارزیابی و عملکرد مدل در رابطه با منحنی مشخصه‌ی عامل‌های گیرنده به شکل کمی هست، که معروف‌ترین آن‌ها مساحت زیرمنحنی است. مساحت زیرمنحنی مقدار متوسط حساسیت برای همه‌ی نقطه‌های برازش ممکن است. مقدار این شاخص از ۰ تا ۱ متغیر است. هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی عمل کرد بهتر مدل در پیش‌بینی ظرفیت آب زیرزمینی است.

بر پایه‌ی این شاخص دقت مدل به طبقه‌های ضعیف (۰/۵ تا ۰/۶)، متوسط (۰/۶ تا ۰/۷)، خوب (۰/۷ تا ۰/۸)، خیلی خوب (۰/۸ تا ۰/۹) و عالی (۰/۹ تا ۱) تقسیم می‌شود. اندازه‌های کم‌تر از ۰/۱ نشان‌دهنده‌ی برازش تصادفی است (یسیل ناکار و توپال ۲۰۰۵). نرم‌افزار R که در این پژوهش از آن بهره‌گرفته شد می‌تواند منحنی مشخصه‌ی عمل کرد نسبی را برآورد کند، محاسبه‌های آماری سطح زیرمنحنی را انجام دهد، و خطای معیار آن را تعیین کند.

یکی از مفهومی‌های پایه‌ی در ترسیم منحنی مشخصه‌ی عامل‌های گیرنده بررسی توزیع داده‌های به‌دست‌آمده از نقشه‌ی امکان آب زیرزمینی و مقایسه‌ی آن با حالت دوگانه‌ی

فاصله‌ی هر نقطه از نزدیک‌ترین رود در این نقشه محاسبه شد. سامانه‌های یادگیری با نظارت به نام ماشین بردار پشتیبان بخشی از روش‌های کرنلی است که در محیط فرضی (فضای مشخصه) تابع‌های خطی با ابعاد زیاد به کار می‌برد، و توانایی پیش‌بینی دارد.

مدل ماشین بردار پشتیبان از اصل کم‌کردن آسیب‌پذیری برنامه به جای کم‌کردن خطای شبیه‌سازی پی‌روی می‌کند. در چند سال گذشته مدل ماشین بردار پشتیبان در زیرشاخه‌های گوناگون اندوخته‌های آب پاسخ مناسبی داشته است (رضانی و ذونعمت کرمانی ۲۰۱۵). این مدل از نمونه‌ی مدل‌های تقریباً روزآمدی است که در سال‌های گذشته عمل‌کردی بسیار عالی نسبت به مدل‌های پیشین، از جمله شبکه‌های عصبی پرسپترون، داشته است.

پایه‌ی کاری طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی خطی اطلاعات است. در طبقه‌بندی خطی اطلاعات تلاش بر این است که خطی در نظر گرفته شود که اطمینان به آن زیادتر باشد. یافتن خط بهینه‌ی اطلاعات با مدل‌های QP انجام می‌شود، که بخشی از مدل‌های شناخته‌شده در پاسخ به معادله‌های محدودیت‌دار است.

پیش از تقسیم‌کردن خطی، در رابطه با این که مدل ماشین این توانایی را داشته باشد که اطلاعاتی با پیچیدگی زیاد را طبقه‌بندی کند، اطلاعات با تابع phi به محیطی با اندازه‌های بسیار بیش‌تر برده می‌شود. وپنیک (۱۹۹۲) با به‌کارگیری توضیح حاصل‌ضرب درونی در محیط‌های هیلبرت و قضیه‌ی هیلبرت-اشمیت اثبات کرد که با وارد کردن بردار ورودی X یک جابه‌جایی ناخطی به محیطی با بعد زیاد منتقل می‌شود.

در این محیط نتیجه‌ی حاصل‌ضرب درونی را به دست آورد. وپنیک و همکاران نشان دادند که اگر یک هسته‌ی متقارن ویژگی مسئله‌ی مرسر را داشته باشد، عمل‌کرد آن در محیط ورودی با بعد کم این توان را دارد که نتیجه‌ی ضرب درونی در محیط هیلبرت با بعد زیاد دانسته شود. بر این پایه، محاسبات تقریباً کم خواهد شد (کورتز و وپنیک ۱۹۹۵).

مدل جنگل تصادفی حالت پیشرفته‌ی مدل ساده‌ی درخت تصمیم‌گیری است. در این مدل میلیون‌ها درخت تصمیم‌گیری برای تجزیه و تحلیل اطلاعات تشکیل داده می‌شود، و برپایه‌ی میانگین مقدار متغیرها در همه‌ی درخت‌ها، وزن متغیرهای مستقل و ارتباط میان متغیرهای وابسته و مستقل تعیین می‌شود.

این راه‌برد موجب کاهش یافتن خطای شبیه‌سازی می‌شود. یکی دیگر از توانایی‌های مدل جنگل تصادفی این است که تعدادی از داده‌ها برای ارزیابی دقت پیش‌بینی و برازش

مجموعه‌ی عددهای روی داد (۱) و نبود روی داد (۰) است.

نتایج

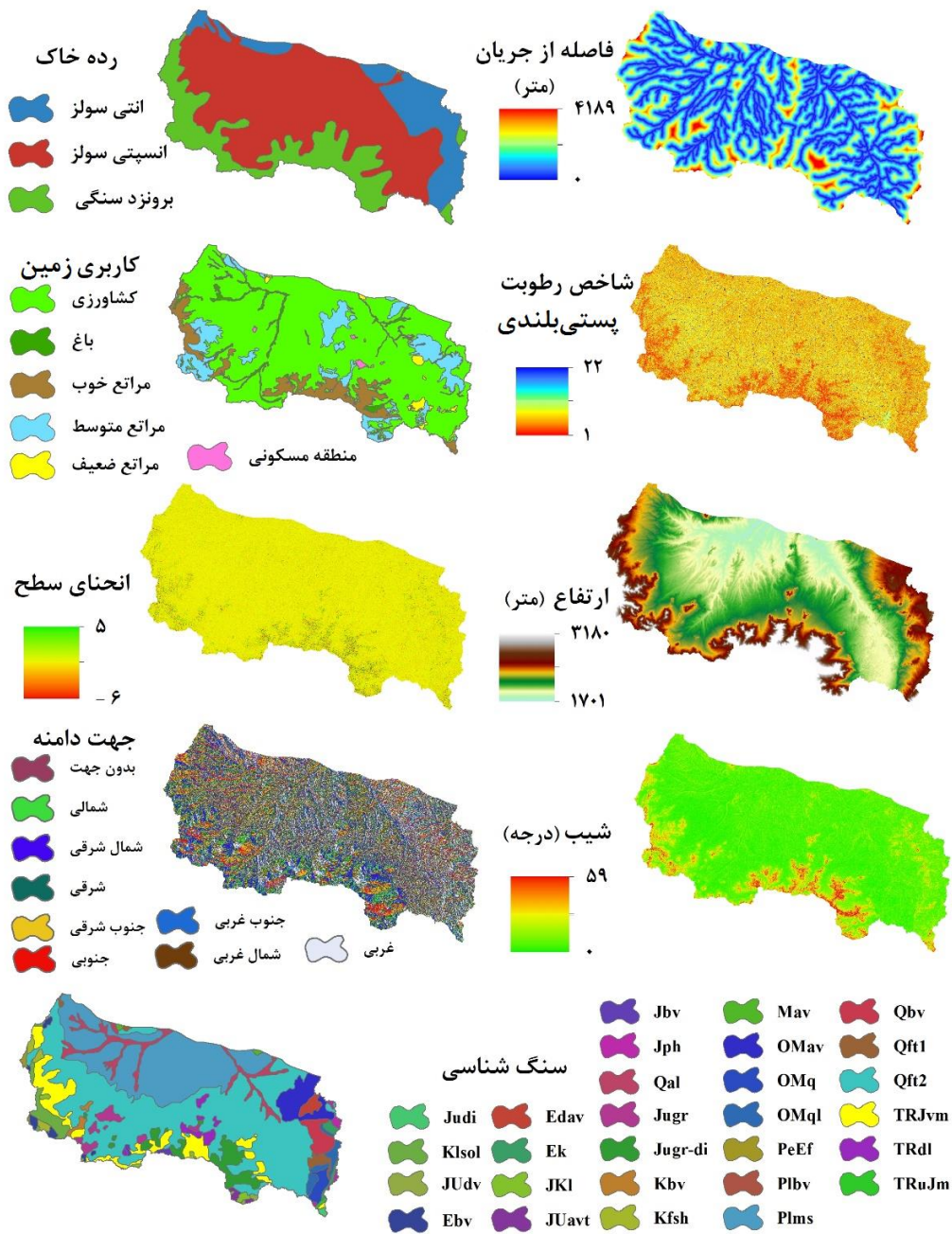
موقعیت مکانی چاه‌های گروه آموزش و اعتبارسنجی در شکل ۱ نشان داده شده است. از آن جا که این دو گروه با کاربرد روش تصادفی تقسیم شده است، پراکنش مناسبی در منطقه دارد. گروه آموزش ۷۰٪ داده‌ها و گروه اعتبارسنجی ۳۰٪ داده‌ها را شامل شده است.

نه متغیر مستقل که بر آب‌های زیرزمینی موثر است بررسی شد و نقشه‌ی آن‌ها برای بهره‌گیری در مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان ترسیم شد (شکل ۲). ۲۸ واحد سنگ شناسی در منطقه هست که هر یک توانایی متفاوتی در ذخیره کردن و انتقال دادن آب زیرزمینی دارد. در این منطقه از نظر خاک‌شناسی دو نوع خاک آنتی‌سولز و انسپتی‌سولز شناسایی شد. باقی منطقه از برون‌زدهای سنگی تشکیل شده است. بیش‌ترین مساحت در این منطقه طبقه‌ی خاک انسپتی‌سولز بود. شاخص رطوبت پستی‌بلندی منطقه از ۱/۶ تا ۲۱/۶ متغیر بود. در بخش‌هایی از منطقه که شیب کم‌تری دارد اما مساحت بالا دست (مشارکت‌کننده در تولید روان‌آب سطحی) آن‌ها بیش‌تر است، شاخص رطوبت پستی‌بلندی بیش‌ترین است. شش طبقه‌ی کاربری زمین در منطقه هست: مرتع فقیر، متوسط، و خوب، و زمین مسکونی، کشاورزی و باغ. مساحت کشاورزی بیش‌ترین، و کم‌ترین مساحت در طبقه‌ی مسکونی بود.

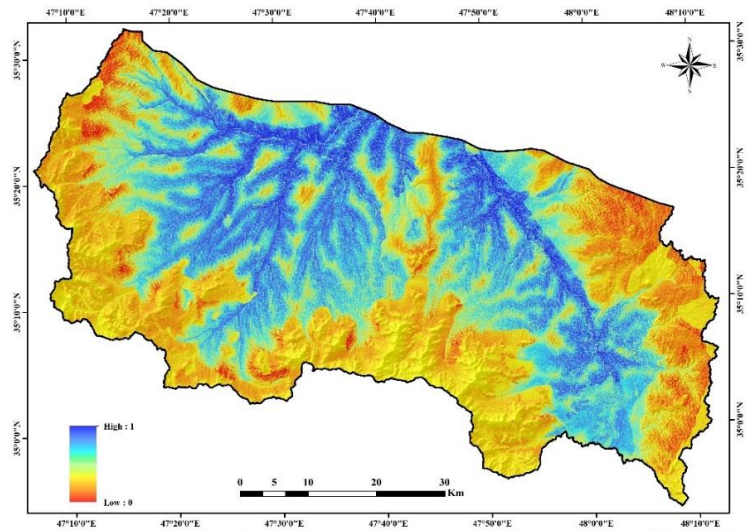
کم‌ترین ارتفاع ۱۷۰۱ متر و بیش‌ترین آن ۳۱۸۰ متر است، که بیان‌گر دامنه‌ی زیاد تغییر پستی‌بلندی است. این عامل‌ها ممکن است بر پایه‌ی‌ترین نقشه‌ی ویژگی‌های کلی منطقه اثر کند. انحنا‌ی زمین این منطقه به سه طبقه‌ی محدب،

مقعر و بی‌انحنا (تخت) طبقه‌بندی شد. بیش‌ترین مساحت در طبقه‌ی تخت بود و مقعر کم‌ترین مساحت داشت. تغییر شیب در این منطقه بسیار زیاد است، به‌گونه‌ی که کم‌ترین آن ۰٪ و بیش‌ترین آن ۵۹/۸٪ است. بخش‌های کم‌شیب در شمال و مرکز منطقه، ولی شیب‌های زیاد در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی است. تنوع طبقه‌های جهت شیب در بخش جنوبی و جنوب غربی منطقه زیاد است. بیش‌ترین مساحت منطقه در طبقه‌ی بی‌جهت است. طبقه‌های جهت شیب تفاوت زیادی در اندازه‌ی گرفتن نور خورشید، ذخیره‌کردن رطوبت خاک و جاگرفتن پوشش گیاهی دارند. شبکه‌ی زه‌کشی گسترده‌ی در منطقه هست که موجب شده است فاصله‌ی هر نقطه از رود یا جریان‌های سطحی کم تا بسیار زیاد باشد. کم‌ترین فاصله از رود ۰، و بیش‌ترین آن ۴۱۸۹ متر بود. از آن جا که روده‌ها عامل اصلی تغذیه‌کردن آبخوان و افزودن بر اندوخته‌های آب زیرزمینی است، تأثیر این متغیر بر تغییر مکانی ظرفیت آن‌ها ممکن است زیاد باشد.

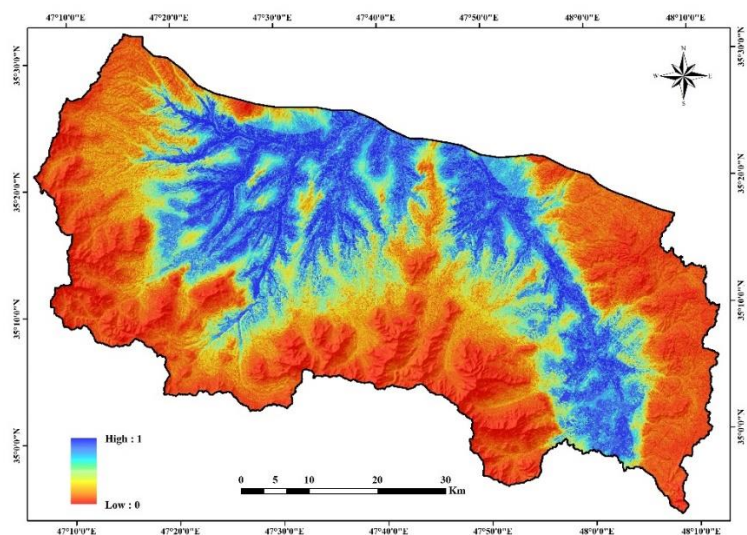
نقشه‌ی به‌دست‌آمده از مدل ماشین بردار پشتیبان در شکل ۳ و مدل جنگل تصادفی در شکل ۴ نشان داده شده است. هر دو مدل نشان داد که تغییر مکانی زیادی در ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی منطقه هست. در بخش‌هایی که مقدار عددی نقطه‌ها نزدیک به ۱ است، ظرفیت آب زیرزمینی بیش‌تر است، و جاهایی که مقدار عددی نقطه‌ها نزدیک به ۰ است احتمال بودن ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی کم است. برپایه‌ی نتیجه‌های هر دو مدل، بیش‌ترین ظرفیت آب زیرزمینی در لکه‌هایی از بخش مرکزی و شمالی منطقه است. کم‌ترین ظرفیت در بخش‌های جنوبی، غربی، شرقی و جنوب غربی است. مدل جنگل تصادفی با احتمال بیش‌تری منطقه‌های با ظرفیت آب زیرزمینی را مشخص کرد (رنگ آبی پررنگ‌تر).



شکل ۲- نقشه‌ی متغیرهای مستقل.



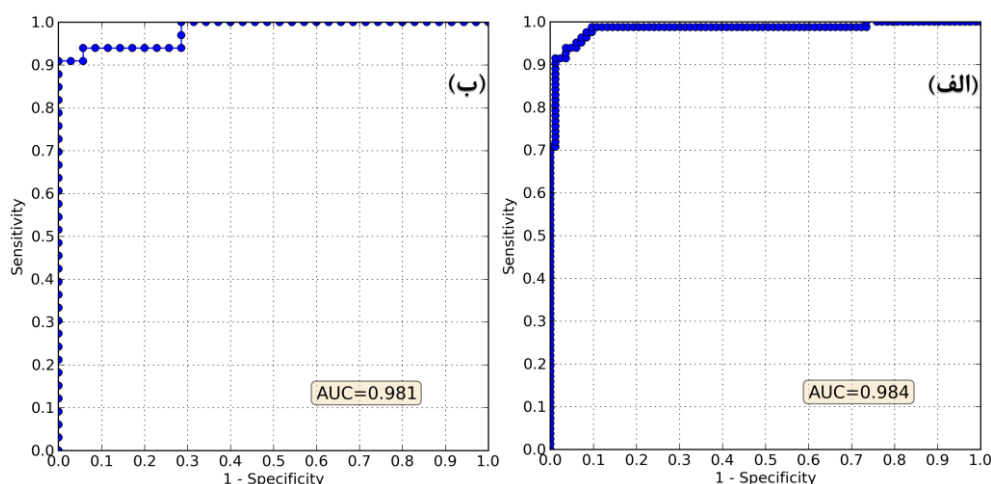
شکل ۳- نقشه‌ی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی با مدل ماشین بردار پشتیبان.



شکل ۴- نقشه‌ی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی با مدل جنگل تصادفی.

برای برنامه‌ریزی برپایه‌ی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی مناسب‌تر است. برپایه‌ی طبقه‌بندی رایج کیفیتی مربوط به پیش‌بینی مدل‌ها، کارآیی هر دو مدل عالی (دقت بیش‌تر از ۹۰٪) بود.

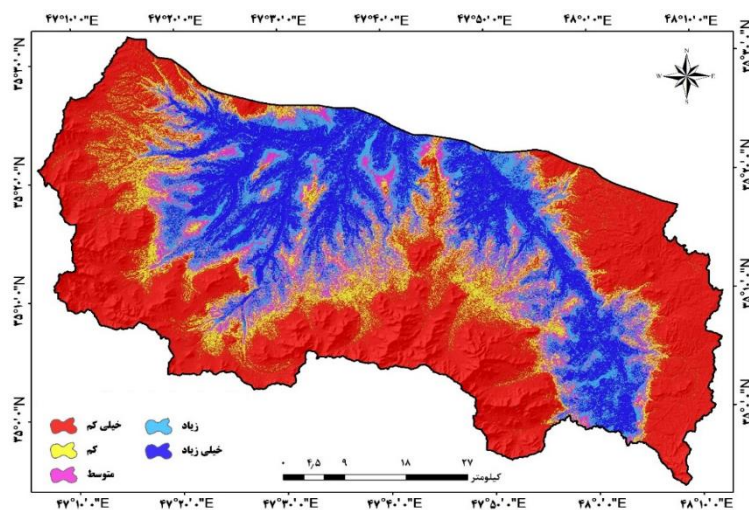
نتیجه‌های ارزیابی مدل‌ها برپایه‌ی روش منحنی ویژگی عمل‌کرد گیرنده‌ی تهیه‌شده با نرم‌افزار R در شکل ۵ نشان داده شده‌است. دقت مدل جنگل تصادفی ۰/۹۸۴ (۹۸/۴٪) و ماشین بردار پشتیبان ۰/۹۸۱ (۹۸/۱٪) بود. بنابراین مدل جنگل



شکل ۵- منحنی های ویژگی عمل کرد گیرنده‌ی مدل جنگل تصادفی (الف) و مدل ماشین بردار پشتیبان (ب).

شد (شکل ۶). این منطقه با روش فاصله‌های یکسان به پنج طبقه‌ی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد.

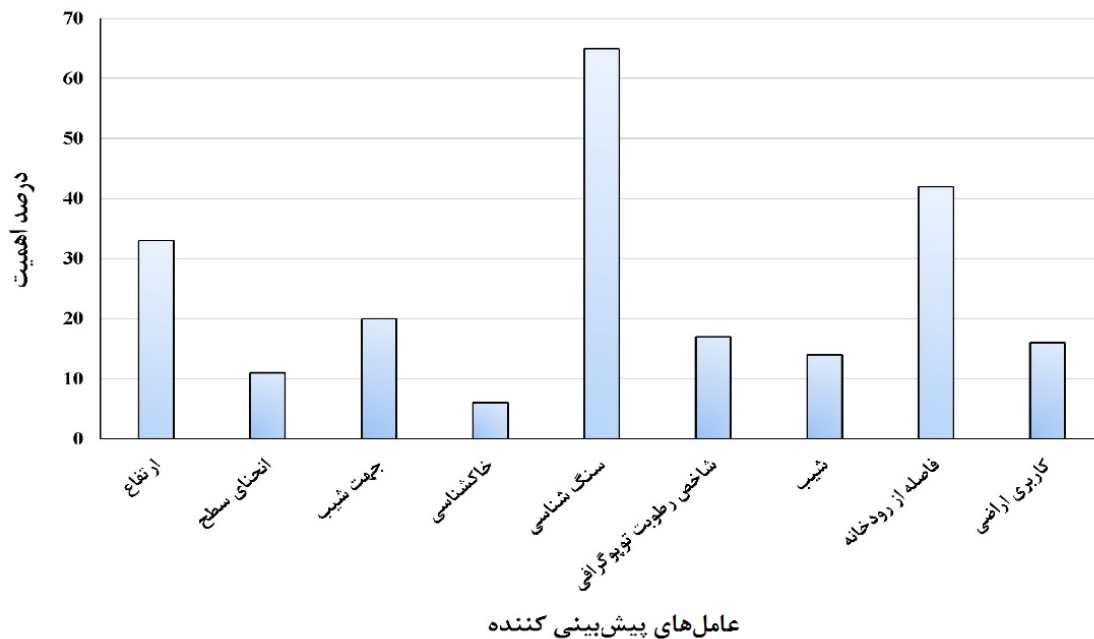
از آن‌جا که دقت مدل جنگل تصادفی بیش‌تر از ماشین بردار پشتیبان بود، نقشه‌ی پهنه‌بندی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی برپایه‌ی نتیجه‌های مدل جنگل تصادفی تهیه



شکل ۶- نقشه‌ی طبقه‌بندی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی برپایه‌ی مدل جنگل تصادفی.

رطوبت پستی‌بلندی، کاربری زمین، شیب زمین و انحنای سطح متوسط بود. عامل‌های خاک‌شناسی کم‌ترین تأثیر در ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی داشت. همه‌ی عامل‌های محیطی در شبیه‌سازی مشارکت داشت، و هر عامل اطلاعات ویژه‌ی به مدل داد تا وضعیت ظرفیت آب زیرزمینی در هر نقطه پیش‌بینی شود.

اندازه‌ی تأثیر عامل‌های محیطی در ظرفیت آب زیرزمینی برپایه‌ی مدل جنگل تصادفی (مدل برتر) ارزیابی شد (شکل ۷). عامل‌های سنگ‌شناسی بیش‌ترین تأثیر را بر ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی منطقه داشت، و پس از آن فاصله از رود و ارتفاع زمین دومین و سومین عامل اثرگذار شناسایی شد. اهمیت برخی عامل‌های محیطی از جمله جهت شیب، شاخص



عوامل‌های پیش‌بینی کننده

شکل ۷- درصد اهمیت عامل‌های پیش‌بینی کننده‌ی ظرفیت آب زیرزمینی.

بحث و نتیجه‌گیری

اندوخته‌های آب زیرزمینی از بارزترین اندوخته‌های طبیعی استان کردستان است که در توسعه‌ی پایدار (مبتنی بر سه مولفه‌ی بوم‌شناسی، اجتماعی و اقتصادی) استان کردستان نقش مهمی دارد. آب برای تولید کشاورزی و دامی، و بخش اصلی آب آشامیدنی منطقه‌های روستایی از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در این پژوهش ظرفیت این اندوخته‌ها با دو مدل یادگیری ماشینی (ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی) و متغیرهای محیطی گوناگون پیش‌بینی کرده شد. دقت نقشه‌های پیش‌بینی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی به‌دست آمده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی بسیار زیاد است، و می‌توان از آن‌ها برای مدیریت و برنامه‌ریزی کردن آب زیرزمینی بهره برد. دقت مدل جنگل تصادفی بیش‌تر از ماشین بردار پشتیبان بود، که با نتیجه‌های نقیبی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. مدل جنگل تصادفی به دلیل این‌که از بی‌نهایت درخت تصمیم‌گیری برای تجزیه و تحلیل داده‌ها بهره می‌گیرد، توانایی بسیار زیادی در شناختن رابطه‌های میان متغیرها و پیش‌بینی کردن دارد. رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) اثبات کردند که مدل جنگل تصادفی می‌تواند فضای مناسبی برای تجزیه و تحلیل داده‌های آب زیرزمینی فراهم کند. مدل ماشین بردار پشتیبان نیز یکی از مدل‌های کارآ برای شناسایی رابطه‌های میان متغیرها در پدیده‌های طبیعی پیچیده است. پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که مدل ماشین بردار پشتیبان دقت

پیش‌بینی مکانی مناسبی برای ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی دارد، و ممکن است ابزار سودمندی در تهیه‌ی نقشه‌ی ظرفیت آب زیرزمینی باشد. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که تغییر مکانی زیادی در ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی هست. بنابراین، بهره‌گیری بهینه و مدیریت آبخوان نیازمند اطلاعات کافی از وضعیت ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی است. توزیع شبکه‌ی چاه‌های پایش و اندازه‌گیری تراز ایست‌آبی و توزیع چاه‌های بهره‌برداری باید برپایه‌ی نقشه‌های ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی طراحی و اجرا گردد.

برپایه‌ی یافته‌های این پژوهش، عامل‌های سنگ‌شناسی بیش‌ترین تأثیر را بر ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی دارد. از آن‌جا که عامل‌های سنگ‌شناسی تعیین‌کننده‌ی ویژگی‌های محیط آبخوان است، همواره نقش مهمی در ذخیره‌کردن و حرکت‌دادن آب زیرزمینی دارد. گوناگونی بسیار زیادی در واحدهای سنگ‌شناسی هست، که موجب می‌شود تغییر مکانی بسیاری در ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی مشاهده شود. در میان واحدهای سنگ‌شناسی، رسوب‌های کواترنری توانایی بیش‌تری برای ذخیره‌کردن و حرکت‌دادن آب زیرزمینی نشان داده است، و این از دلایل اصلی ظرفیت زیاد اندوخته‌های آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و غربی حوزه است. این یافته که عامل‌های سنگ‌شناسی مهم‌ترین متغیر پیش‌بینی کننده‌ی ظرفیت آب زیرزمینی است با یافته‌های دیگر پژوهش‌گران از جمله ذبیحی و همکاران (۲۰۱۶) و گلکاریان

و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد.

عامل‌های فاصله از رود دومین متغیر تأثیرگذار بر ظرفیت آب زیرزمینی دانسته شد. دلیل آن نقش مهم رودهای منطقه در تغذیه کردن سفره‌های آب زیرزمینی است. برپایه‌ی یافته‌های این پژوهش، منطقه‌هایی که نزدیک رودها است شرایط مناسب تری برای تغذیه کردن آبخوان و ظرفیت آب زیرزمینی دارد. شبکه‌ی زه‌کشی منطقه از بخش جنوبی سرچشمه گرفته است، و به سوی بخش‌های شمالی سرازیر می‌شود، و آب‌دهی آن‌ها در بخش‌های شمالی بیش‌تر است. انطباق مکانی نقشه‌های ظرفیت آب زیرزمینی و نقشه‌ی فاصله از رود (و درجه‌ی دگرگونی و بزرگی رود) نشان می‌دهد که بخش‌های شمالی به دلیل داشتن رودهای پرآب‌تر، شرایط مناسب‌تری برای تغذیه کردن آبخوان دارد، و ظرفیت آب زیرزمینی در آن بخش‌ها از منطقه‌های جنوبی (که غالباً آب‌راه‌های درجه‌ی ۱ و کم‌آب دارد) بیش‌تر است. این نتیجه‌ها با یافته‌های کردستانی و همکاران (۲۰۱۹) و رازندی و همکاران (۲۰۱۵) هم‌راستا است، و نقش رودها در ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی را شفاف‌تر می‌کند.

ارتفاع زمین سومین متغیر اثرگذار شناخته شد. عامل‌های ارتفاع مستقیم و نامستقیم بر ویژگی‌های منطقه اثر می‌کند. برای نمونه، بارندگی و پوشش گیاهی برپایه‌ی شیب ارتفاعی در سطح وسیع تغییر محسوس دارد. در بخش‌های مرتفع معمولاً شرایط مناسبی برای تغذیه‌ی آبخوان نیست، و ضخامت آبخوان در آن بسیار کم است، که به نوبه‌ی خود تأثیر بسزایی بر ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی دارد. نتیجه‌های این پژوهش اثبات کرد که در بخش‌های مرکزی و شمالی ارتفاع کم و ضخامت آبخوان بیش‌تر است، و ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی در این محدوده‌ها بیش‌تر از منطقه‌های مرتفع است. پژوهش رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) نشان‌دهنده‌ی نقش عامل‌های ارتفاع در پیش‌بینی ظرفیت آب زیرزمینی است، و با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی کامل دارد. در پژوهش ماچیوال و همکاران (۲۰۱۱) که به پیش‌بینی مکانی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی پرداختند، نتیجه‌ها نشان داد که عامل ارتفاع یکی از پایه‌ی‌ترین منابع اطلاعاتی است، زیرا نقش مهمی در وضعیت ظرفیت آب زیرزمینی دارد.

شیب زمین در این پژوهش نقشی نسبتاً مهم در شبیه‌سازی ظرفیت آب زیرزمینی داشت، به گونه‌ی که یکی از متغیرهای پیش‌بینی کننده با مشارکت متوسط در شبیه‌سازی شناخته شد. قطعاً شیب زمین ممکن است شرایط را برای نفوذ روان‌آب‌ها و تغذیه‌ی آبخوان فراهم آورد. برپایه‌ی نتیجه‌های این پژوهش، شیب بخش‌های مرکزی و شمالی کم‌تر است، و ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی در آن بیش‌ترین است. بخش‌های پرشیب جنوب منطقه کم‌ترین ظرفیت برای آب

زیرزمینی داشت. اگر چه برخی از پژوهشگران معتقد اند که تغییر شیب زمین در دشت‌ها کم است، و به همین دلیل نمی‌تواند بر ظرفیت آب زیرزمینی اثر بگذارد، پژوهش‌های عادیات و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که هنگامی که عامل شیب زمین از شبیه‌سازی حذف می‌شود، دقت پیش‌بینی مدل برای ظرفیت‌یابی اندوخته‌های آب زیرزمینی افت بسیاری می‌کند. نتیجه‌های این پژوهش نیز یافته‌های عادیات و همکاران (۲۰۱۲) را تأیید می‌کند.

جهت شیب در تجزیه‌تحلیل مکانی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی نقش بسیار معنی‌داری داشت، به گونه‌ی که توانایی بخش‌های بی جهت برای ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی بیش‌ترین بود. بخش‌های بی جهت بیش‌تر در بخش‌های مرکزی و شمالی است. بخش‌هایی که جهت شیب شمالی یا غربی دارد معمولاً پوشش گیاهی مناسب‌تری دارد، که دلیل آن نگر داشتن رطوبت بیش‌تر در خاک در این جهت‌های شیب است. پوشش گیاهی موجب کاسته‌شدن از ضریب روان‌آب و افزوده شدن بر فرصت نفوذ آن در خاک است. بنابراین جهت شیب نامستقیمانه بر ظرفیت تغذیه‌شدن آبخوان و ظرفیت آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. یافته‌های فلاح و همکاران (۲۰۱۷) در استان لرستان تأییدکننده‌ی این است، و با نتیجه‌های این پژوهش هم‌خوانی دارد. میرکی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که لایه‌ی جهت شیب اطلاعات مفیدی به مدل می‌دهد تا مدیریت بهتری در اندوخته‌های آب زیرزمینی انجام گیرد.

شاخص رطوبت پستی‌بلندی شاخصی ترکیبی است که دو مولفه‌ی شیب و مساحت مشارکت‌کننده در تولید روان‌آب را برای هر نقطه در نظر می‌گیرد. این شاخص نشان داد که موجب افزایش دقت پیش‌بینی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی می‌شود. در این پژوهش اهمیت شاخص رطوبت پستی‌بلندی متوسط بود. برپایه‌ی نتیجه‌های چن و همکاران (۲۰۱۸) شاخص رطوبت پستی‌بلندی نشان‌دهنده‌ی شرایط نفوذ جریان‌های آب‌راهی و رودی به سفره‌های آب زیرزمینی، و تغذیه‌شدن آبخوان است. هرچه بیش‌تر باشد، ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی بیش‌تر است.

اگرچه کاربری زمین در این پژوهش تأثیر زیادی در شبیه‌سازی ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی نداشت، نشان‌دهنده‌ی شیوه‌ی مدیریت زمین و دخالت‌های انسانی است. کاربری زمین تعیین‌کننده‌ی اندازه‌ی برداشت آب زیرزمینی و روند بازگشت آب آبیاری به سفره‌های آب زیرزمینی است. کشاورزی در این منطقه فعال است، و برداشت آب زیرزمینی در بخش‌های زیادی از آن بی‌رویه است. کاربری زمین علاوه بر کمیت اندوخته‌های آب زیرزمینی، تأثیر بسزایی در کیفیت آن دارد. پژوهش پاترا و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که کاربری زمین یکی از مولفه‌های مهم در مدیریت اندوخته‌های آب زیرزمینی

اوه و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان داد که در میان متغیرهای محیطی، لایه‌ی انحنای تراز مشارکت کم‌تری از دیگر عامل‌ها دارد که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد.

ویژگی‌های خاک‌شناسی تأثیر به‌سزایی در اندازه‌ی نفوذپذیری لایه‌های سطح زمین دارد که نامستقیمانه بر تغذیه‌ی آبخوان اثر می‌گذارد. با این‌که اطلاعات خاک‌شناسی جزئی و دقیق از این منطقه در دست نیست، تغییر مکانی نقشه‌ی طبقه‌ی خاک کم بود.

تأثیر لایه‌ی خاک‌شناسی بر شبیه‌سازی آب زیرزمینی کم‌ترین بود. دلیل احتمالی آن ممکن است کم‌بودن دقت نقشه‌ی طبقه‌ی خاک باشد، زیرا اطلاعات جزئی و کاملی از ویژگی‌های خاک‌شناسی همه‌ی بخش‌های منطقه نبود. با اثبات کارایی مدل‌های به‌کاررفته در ظرفیت‌یابی اندوخته‌های آب زیرزمینی در این منطقه، بهره‌گیری از آن‌ها در منطقه‌هایی که داده‌های آبی آن‌ها از آبخوان کافی نیست، ممکن است ابزاری پرتوان باشد.

است و باید از آن در شبیه‌سازی ظرفیت اندوخته‌های آب بهره گرفته شود. نتیجه‌های این پژوهش یافته‌های فام و همکاران (۲۰۱۹) را تأیید می‌کند که نشان دادند در دشت‌هایی که بخش بزرگی از کاربری زمین آن کشاورزی است، مشارکت آن در شبیه‌سازی کم است، زیرا تغییر مکانی آن کم است و پراکنش زیادی درست نمی‌کند.

انحنای سطح بیان‌گر تغییر انحنای سطح زمین است، و جریان سطحی و نگهداشت آب بیش‌تر در سطح وسیع تحت تأثیر این عامل‌ها است. بخش‌هایی که انحنای آن مقعر یا تخت است شرایط مناسب‌تری برای نگهداشت آب و تغذیه‌کردن سفره‌های آب زیرزمینی دارد. این فرآیند به نوبه‌ی خود موجب بهبود ظرفیت اندوخته‌های آب زیرزمینی می‌شود. در منطقه‌ی ناهموار این عامل‌ها اطلاعات زیادی به مدل می‌دهد تا وضعیت نگهداشت و تغذیه‌ی لایه‌های زیرین بررسی شود. از آن‌جا که تغییر پستی و بلندی زیادی در این منطقه مشاهده نشد، تأثیر لایه‌ی انحنای سطح در شبیه‌سازی کم بود. نتیجه‌های پژوهش

- Abasi S, Heydari M. 2017. The groundwater potential assessment by the use of AHP and Fuzzy techniques (Case study of Northern Basins of Ilam Province). *Hydro Geomorphology*. 3(6):75–93. (In Persian).
- Adiat KAN, Nawawi MNM, Abdullah K. 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool—a case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*. 440–441:75–89.
- Alizadeh A. 2003. Principles of applied hydrology, Sixteenth edition. Imam Reza University Publication. Mashhad. (In Persian).
- Andualem TG, Demeke GG. 2019. Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna Tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 24(100610): 1–13.
- Ansari MS, Shamsaie A, Bwani AM. 2011. Modeling of groundwater level changes in Sefid Dasht by GMS model. The 2nd Iranian National Conference on Applied Research in Water Resources. Zanjan. 9 p. (In Persian).
- Arabameri A, Rezaei K, Cerda A, Lombardo L, Rodrigo-Comino J. 2019. GIS-based groundwater potential mapping in Shahroud plain, Iran. A comparison among statistical (bivariate and multivariate), data mining and MCDM approaches. *Sci. Total Environ*. 646–697(658): 160–177.
- Ataei H, Ghaderi N, Ghaderzadeh H. 2012. Investigating the relationship of precipitation, humidity, evaporation and groundwater level fluctuations of Dehgolan aquifer. *Geographical Research*. 26(4):187–208. (In Persian).
- Breiman L. 2001. Random forests. *Machine Learning*. 45(1): 5–32.
- Chen W, Li H, Hou E, Wang S, Wang G, Panahi M, Li T, Peng T, Guo C, Niu C, Xiao L. 2018. GIS-based groundwater potential analysis using novel ensemble weights-of-evidence with logistic regression and functional tree models. *Science of the Total Environment*, 634: 853–867.
- Choubin B, Rahmati O. 2021. Groundwater potential mapping using hybridization of simulated annealing and random forest. Editor(s): Pijush Samui, Hossein Bonakdari, Ravinesh Deo. *Water Engineering Modeling and Mathematic Tools*. Elsevier. 391–403.
- Choubin B, Rahmati O, Soleimani F, Alilou H, Moradi E, Alamdari N. 2019. Regional groundwater potential analysis using classification and regression trees. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. Elsevier. 485–498.
- Cortes C, Vapnik V. 1995. Support-vector networks. *Machine Learning*. 20(3): 273–297.
- Ehteshami M, Aghasi A, Rezaie RA. 2002. Investigation of the evolution of groundwater potential in Hashtgerd Plain in the last ten years and its causes. *Journal of Environmental Science and Technology (JEST)*. 13(4): 61–74. (In Persian).
- Falah F, Ghorbani Nejad S, Rahmati O, Daneshfar M, Zeinivand H. 2017. Applicability of generalized additive model in groundwater potential modelling and comparison its performance by bivariate statistical methods. *Geocarto International*. 32(10):1069–1089.
- Fawcett T. 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 27(8):861–874.
- Friedl MA, Brodley CE, Strahler AH. 1999. Maximizing land cover classification accuracies produced by decision trees at continental to global scales. *IEEE Trans Geoscience Remote Sense*. 37(2): 969–77.
- Ghafari S. 2008. Development and management of water resources in Iran to deal with droughts, 3rd Iran Water Resources Manage-

- ment Conference, Tabriz. 746 p. (In Persian).
- Golkarian A, Naghibi SA, Kalantar B, Pradhan B. 2018. Groundwater potential mapping using C5. 0, random forest, and multivariate adaptive regression spline models in GIS. *Environ Monit Assess.* 190 (3):149.
- Hesami A. 2016. Study of rainfall trend and the volume of groundwater in Marivan Plain using geographic information systems. *Environment and Water Engineering.* 2(1): 13–24. (In Persian).
- Jaafarzadeh MS, Tahmasebipour N, Haghizadeh A, Pourghasemi H, Rouhani H. 2021. Groundwater recharge potential zonation using an ensemble of machine learning and bivariate statistical models. *Scientific Reports.* 11(1): 1–18.
- Jensen JR. 2015. *Introductory digital Image pProcessing: A remote sensing perspective*, 4th edn. Prentice Hall Press, Englewood Cliffs. 544 p.
- Khashei SA, Ghahrman B, Kouchakzadeh M. 2011. Fuzzy-analytic hierarchy process method for evaluating groundwater potentials of aquifers (Case study: Nayshabur Plain). *Iranian Water Researches Journal.* 5(9): 171–180. (In Persian).
- Khoshhal J, Ghayoor A, Moradi M. 2012. A survey on the impact of groundwater drought in Dehgolan Basin, Kurdistan Province. *Physical Geography Research Quarterly.* 44(1): 19–36. (In Persian).
- Kordestani MD, Naghibi SA, Hashemi H, Ahmadi K, Kalantar B, Pradhan B. 2019. Groundwater potential mapping using a novel data-mining ensemble model. *Hydrogeol Journal.* 27(1): 211–224.
- Machiwal D, Jha MK, Mal BC. 2011. Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of India using remote sensing, GIS and MCDM techniques. *Water Resources Management.* 25(5):1359–1386.
- Miraki S, Zanganeh SH, Chapi K, Singh VP, Shirzadi A, Shahabi H, Pham BT. 2019. Mapping groundwater potential using a novel hybrid intelligence approach. *Water Resources Management.* 33(1):281–302.
- Mosavi A, Hosseini FS, Choubin B, Goodarzi M, Dineva AA, Sardooi ER. 2021. Ensemble boosting and bagging based machine learning models for groundwater potential prediction. *Water Resources Management.* 35(1): 23–37.
- Mountrakis Giorgos. Im Jungho. Ogole Caesar. 2011. Support vector machines in remote sensing: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 66(3): 247–259.
- Naghibi SA, Moghaddam DD, Kalantar B, Pradhan B, Kisi O. 2017. A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping. *Journal of Hydrology.* 544–555(548): 471–483.
- Oh HJ, Kim YS, Choi JK, Park E, Lee S. 2011. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology.* 399(3–4): 158–172.
- Pal M. 2005. Random Forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing.* 26(1): 217–22.
- Panahi M, Sadhasivam N, Pourghasemi HR, Rezaie F, Lee S. 2020. Spatial prediction of groundwater potential mapping based on convolutional neural network (CNN) and support vector regression (SVR). *Journal of Hydrology.* 580–591(588): 1–12.
- Patra S, Sahoo S, Mishra P, Mahapatra SC. 2018. Impacts of urbanization on land use/cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of Urban Management.* 7(2):70–84.
- Pham BT, Jaafari A, Prakash I, Singh SK, Quoc NK, Bui DT. 2019. Hybrid computational intelligence models for groundwater potential mapping. *Catena.* 172–183(182): 104101.
- Rahimi D. 2012. Potential ground water resources: (Case study: Shahrekord Plain). *Geography*

- and Environmental Planning. 22(4):127–142. (In Persian).
- Rahimi M, Solaimani K. 2017. Remote sensing and GIS based assessment groundwater potential zones mapping using multi-criteria decision making technique. Iranian Journal of Watershed Management Science. 10(35): 27–38. (In Persian).
- Rahmati O, Pourghasemi HR, Melesse AM. 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. 136–147(137):360–372.
- Ramezani Charmahineh A, Zounemat Kermani M. 2015. Evaluation of support vector machine, and linear and quadratic discriminant analysis for groundwater level variations in Shahrekord Plain. Iran-Water Resources Research. 11(2):97–105. (In Persian).
- Razandi Y, Pourghasemi HR, Neisani NS, Rahmati O. 2015. Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. Earth Science Informatics. 8(4):867–883.
- Rezaei Moghaddam MH, Rahimpour T, Nakhostinrouhi M. 2016. Potential detection of the groundwater resources using analytic network process in geographic information system (Case study: Basins Leading to Tabriz Plain). Ecohydrology. 3(3):379–389. (In Persian).
- Yesilnacar E, Topal T. 2005. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek Region (Turkey). Eng. Geol. 79(3–4): 251–266.
- Zabihi M, Pourghasemi HR, Pourtaghi ZS, Behzadfar M. 2016. GIS-based multivariate adaptive regression spline and random forest models for groundwater potential mapping in Iran. Environmental Earth Sciences. 75(8):1–19.



Watershed Management Research

VOL. 35, No.1, Ser. No: 134, Spring 2022, pp. 73-87
DOI: 10.22092/WMRJ.2021.354418.1407

Research Paper



Spatial Modeling of Groundwater Resources Potential in Telvar Watershed using Support Vector Machine and Random Forest Models

Edris Sayfi Selseleh

M.Sc. Student, Department of Geography, Payame Noor University, Iran

Mohammad Sedigh Ghorbani

(Corresponding Author)* Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Iran

Negin Aali

Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Iran

*Corresponding Author's Email: ms.ghorbani1978@gmail.ac.ir

Received: 09 May 2021

Accepted: 20 September 2021

Abstract

In this research, it is tried to identify the potential status of groundwater resources in different parts of the Telvar watershed using two machine learning models including support vector machine and random forest models. Initially, information about the wells in the region was received from the Regional Water Company of Kurdistan. The wells in the area were randomly divided into two groups of training (including 70% of data) and validation (including 30% of data). Elevation, slope, slope direction, lithology, pedology, surface curvature, land use, topographic moisture index and distance from the river were selected as predictor variables and their map was prepared in the GIS environment. The data of the training group along with the maps related to the predictor variables were entered into the support vector machine model and the random forest model. Based on the data of the training group, the parameters of the model were calibrated and adjusted and the potential of groundwater resources was predicted. The prediction accuracy of the models was determined using the statistical method of performance characteristic curve in two stages of training and validation. The results showed that accuracy of the random forest model (98.4%) was more than the support vector machine model (98.1%).

■ **Keywords:** GIS, groundwater, modeling, Telvar watershed ■