

ارزیابی جامع ریسک شوری آبخوان سرخون با بهره‌گیری از ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین

فریبرز محمدی^{۱*}، علیرضا نفرزادگان^۲، محمد کاظمی^۳

۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس
۲. استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس
۳. استادیار، مرکز مطالعات و تحقیقات (پژوهشکده) هرمز، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲)

چکیده

ارزیابی ریسک شوری آبخوان به‌خصوص در مناطق نزدیک ساحل اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر تلاش شد از طریق ترکیب مدل پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، چارچوب جامعی برای ارزیابی ریسک شوری در آبخوان سرخون واقع در استان هرمزگان ایجاد شود. در مرحله نخست لایه‌های ورودی مورد نیاز برای تولید نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان براساس مدل دراستیک تهیه و ترکیب شد. سپس، با استفاده از سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، افزایش گرادیان اکسترم (XGBoost) و درختان رگرسیون جمع‌شده بیزی (BART) و با استفاده از ۱۲ فاکتور تأثیرگذار روی آب زیرزمینی از جمله رطوبت توپوگرافیک، خاک، پوشش گیاهی و عوامل دیگر، نقشه احتمال خطر شور شدن تهیه شد. قبل از مدل‌سازی آزمون هم‌خطی روی داده‌ها انجام شد و مشاهده شد که هم‌خطی در بین پارامترهای ورودی مدل‌ها وجود ندارد. ارزیابی کارایی مدل‌سازی با منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) نشان داد هر سه الگوریتم دقت بسیار خوب و سطح زیرمنحنی (AUC) بیش از ۹۰ درصد دارند. بنابراین، هر سه مدل بر اساس میزان سطح زیرمنحنی خود ترکیب شدند تا یک نقشه واحد برای احتمال وقوع خطر شوری به دست آید. در انتها، نقشه ریسک شوری براساس مقادیر آسیب‌پذیری، شوری و احتمال وقوع خطر تهیه شد. نقشه ریسک به دست آمده نشان داد قسمت‌های شرقی آبخوان ریسک شوری بسیار زیاد دارد که علت این امر تمرکز زیاد زمین‌های کشاورزی در این بخش دشت است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد دستیابی به یک نقشه قابل اتکا برای ارزیابی ریسک شوری آبخوان به وسیله ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین و مدل‌های آسیب‌پذیری آبخوان امکان‌پذیر است.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، خطر شوری، جنگل تصادفی، شاخص دراستیک، پتانسیل آسیب‌پذیری.

مقدمه

آبخوان‌های ساحلی، از مهم‌ترین ذخایر منابع آب، در این مناطق هستند. با افزایش بهره‌برداری از آبخوان‌ها، توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارندگی و کم بودن تغذیه طبیعی نسبت به میزان برداشت، شوری این منابع افزایش می‌یابد و به تدریج آلودگی سفره‌های آب شیرین را در پی خواهد داشت. بنابراین، در استفاده از منابع آب زیرزمینی به‌خصوص در آبخوان‌های ساحلی، باید مسائل به‌دقت بررسی شده و همچنین در مورد میزان بهره‌برداری تصمیم‌های مناسبی به کار گرفته شود [۱]. شوری مفهومی مناسب برای بیان کیفیت آب است و امروزه شور شدن آب‌های شیرین، یکی از تهدیدهای جدی در بحث آلودگی آب و خاک است. در بسیاری موارد، آلودگی آب‌های زیرزمینی، در زمانی تشخیص داده می‌شود که چاه‌های آب آلوده شده‌اند و رفع آلودگی آبخوان تقریباً غیرممکن است. بنابراین، پایش و محافظت از این منابع آسیب‌پذیر یک موضوع حیاتی است [۲].

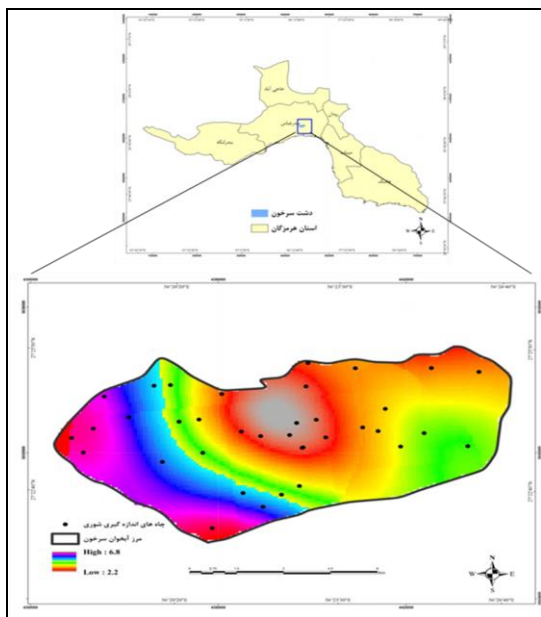
روش‌ها و ابزارهای مختلفی از جمله بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه، روش‌های ژئوفیزیکی و توموگرافی مقاومت الکتریکی^۱ [۳]، استفاده از ردیاب‌ها و ایزوتوپ‌های محیطی [۴]، روش‌های هیدروژئوشیمیایی، مطالعات تجربی و شبیه‌سازی انتقال جریان و انتشار آلودگی در آب‌های زیرزمینی برای ارزیابی نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی استفاده شده است که از این میان، روش‌های هیدروژئوشیمیایی کاربرد فراوانی دارند [۵].

رویکردهای مختلفی از جمله روش‌های درون‌یابی، مدل‌های آماری، روش‌های شاخصی و مدل‌های فرایندمحور برای ارزیابی آلودگی و آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در دنیا وجود دارد. روش اول بر پایه تکنیک‌های زمین‌آماری مانند روش‌های کریجینگ [۶] برای ارزیابی ریسک آلودگی در آب زیرزمینی است. این روش‌ها نیاز به نقاط نمونه‌برداری با تراکم زیاد دارند و اغلب با عدم قطعیت‌های زیادی روبه‌رو هستند. رویکرد دوم یعنی مدل‌های آماری بر پایه روش‌های آماری مانند رگرسیون خطی و غیرخطی [۷] هستند. این روش‌ها قادر به مدل‌سازی آلودگی از طریق همبستگی میان غلظت آلوده‌کننده‌ها و پارامترهای مؤثر مختلف هستند [۸]. با این حال، همبستگی به معنای علیت نیست و این مدل‌ها برای

پیش‌بینی دقیق و معنادار به دانش متخصصان نیاز دارند. گروه سوم یعنی روش‌های شاخصی، بیشتر بر اساس وزن فاکتورهای مؤثر کار می‌کنند و اغلب این وزن‌ها بر اساس تجربه متخصص اختصاص داده می‌شود. از بین این روش‌ها می‌توان به شاخص آسیب‌پذیری (SI) [۹]، روش دراستیک [۱۰]، روش [۱۱GOD] و مدل [۱۲DRAV] اشاره کرد. چهارمین و پیچیده‌ترین نوع از روش‌ها، مدل‌های فرایندمحور مانند [۱۳MODFLOW] هستند. ضعف‌های اصلی مرتبط با این مدل‌ها این است که نخست نیاز به داده‌های ورودی زیاد دارند [۱۴]، و دوم اینکه قابلیت کاربرد محدود در مقیاس‌های منطقه‌ای دارند [۱۵]. در بیشتر مطالعات قبلی در مورد آسیب‌پذیری و ریسک آلودگی آبخوان فقط از روش‌های شاخصی استفاده شده است. برای نمونه، نوحه‌گر و ریاحی [۱۶] به مطالعه آسیب‌پذیری آبخوان سرخون با استفاده از مدل دراستیک^۲ و دراستیک فازی پرداخته‌اند و در انتها نتایج این دو روش با استفاده از عامل هدایت الکتریکی (EC) صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد مدل فازی همبستگی بیشتری با عامل EC دارد. نخعی و همکاران [۱۷] نیز با استفاده از مدل دراستیک به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان خاتون‌آباد در استان کرمان پرداختند. آنها برای ارزیابی نتایج از همپوشانی نقشه مدل دراستیک و نیترات استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد هیچ‌یک از نقاطی که نیترات زیاد دارند، در محدوده با استعداد آلودگی کم قرار نگرفته‌اند و صحت نتایج مدل تأیید شد. البته، مَتْرُو و همکاران [۱۸] با استفاده از روش‌های SINTACS، SI و IPNOA به بررسی ریسک آلودگی نیترات در منطقه ساردینیا در ایتالیا پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در زمین‌های کشاورزی و مناطقی که دامداری انجام می‌دهند، ریسک نیترات زیاد است.

اخیراً استفاده از هوش مصنوعی در قالب الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۳ به طور موفقیت‌آمیزی برای پیش‌بینی خطر و ریسک در علوم محیطی به کار گرفته شده‌اند [۱۹ و ۲۰]. ترکیب روش‌های یادگیری ماشین با فاکتورهای مؤثر بر مکانیزم شوری می‌تواند صحت نقشه ریسک شوری را در نواحی ساحلی افزایش دهد [۲۱]. برزگر و همکاران با استفاده

صورت‌گرفته به دلیل افت آب زیرزمینی منطقه، کشاورزان دشت سرخون اقدام به نصب ۲۳ واحد آب‌شیرین‌کن روی چاه‌های کشاورزی کرده‌اند. پساب تولیدی این آب‌شیرین‌کن‌ها پس از تولید دوباره وارد چرخه آب زیرزمینی شده، که این امر سبب شوری و کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی در آینده می‌شود [۲۳].



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده و مختصات چاه‌های اندازه‌گیری شوری (EC)

روش کار

چارچوب جامع روش پیشنهادی در مطالعه حاضر براساس مراحل زیر است: ۱. تهیه نقشه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل دراستیک؛ ۲. تهیه نقشه شوری (EC) آب زیرزمینی؛ ۳. تهیه نقشه احتمال خطر شوری؛ ۴. تهیه نقشه ریسک شوری آب زیرزمینی. این مراحل در ادامه توضیح داده خواهد شد.

تهیه نقشه آسیب‌پذیری با استفاده از مدل دراستیک

این روش در بسیاری از کشورها (مانند هند و ایران) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی، به علت قابلیت دسترسی آسان به داده‌های ورودی استفاده شده است [۲۴ و ۲۵]. نام این مدل (DRASTIC) از حروف اول پارامترهای ورودی گرفته شده که شامل D یا عمق رسیدن به آب، R

از ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با مدل دراستیک به بررسی ریسک آلودگی آبخوان در دشت مرند پرداختند [۲۲]. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده دقت زیاد روش به‌کاررفته است. در تحقیق حاضر تلاش خواهد شد که با یک ارزیابی جامع اقدام به تهیه نقشه ریسک شوری در آبخوان دشت سرخون واقع در استان هرمزگان شود. به این منظور، نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از مدل دراستیک تهیه خواهد شد. برای تهیه نقشه خطر شوری از سه مدل داده‌کاوی استفاده خواهد شد. در ادامه، این سه مدل ترکیب شده و نقشه ریسک نهایی تولید خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

آبخوان سرخون با مساحتی حدود ۷۶۳۶ هکتار به فاصله تقریبی ۲۵ کیلومتری از بندرعباس در دامنه شرقی-شمال شرقی کوه گنو واقع شده است. این محدوده مطالعاتی از شمال شرق و شرق به محدوده شمیل-تخت، از شمال به محدوده سرزه سیاهو، از غرب به محدوده‌های رضوان، ایسین شرقی و بندرعباس و از جنوب به خلیج فارس منتهی می‌شود (شکل ۱). میانگین بارندگی طولانی‌مدت در مناطق ارتفاعی و دشتی به ترتیب ۲۳۴ و ۲۱۹ میلی‌متر است. منطقه مطالعه شده از نظر زمین‌شناسی ساختاری، در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است. در این محدوده، سازندهایی از پرکامبرین تا کواترنر وجود دارد. جنس آبرفت در بخش غربی و ورودی دشت و همچنین مرکزی دشت، دانه‌درشت است و با پیشروی به سمت شمال شرق و جنوب و به‌خصوص شرق و جنوب شرقی (خروجی دشت) از قطر دانه‌بندی آبرفت کاسته می‌شود و آبرفت حالت دانه‌ریز پیدا می‌کند. این دشت جزء دشت‌های ممنوعه بحرانی است، در این دشت ۴۴۶ حلقه چاه دارای پروانه با تخلیه سالانه ۲۵/۲ میلیون مترمکعب وجود دارد که در حال حاضر میزان تخلیه سالیانه از حد مجاز بیشتر است، به طوری که طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۵ میزان افت سطح آب زیرزمینی دشت برابر با ۸۲ سانتی‌متر و میزان کسری مخزن برابر با ۲/۴۹- میلیون مترمکعب بوده است. همچنین، افت شدید سطح آب زیرزمینی، تخریب کیفی آب زیرزمینی دشت سرخون نیز به وقوع پیوسته است. بر اساس بررسی‌های

توپوگرافی به صورت شیب و تغییرات شیب سطح زمین مورد توجه قرار می‌گیرد. برای تهیه لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع SRTM با پیکسل سایز ۳۰ متر استفاده شد. لایه محیط غیر اشباع همانند لایه محیط آبخوان از لوگ پیژومترها، لوگ چاه‌های اکتشافی موجود در منطقه، موقعیت جغرافیایی لوگ‌ها و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس منطقه غیر اشباع تهیه شد. هدایت هیدرولیکی بیان‌کننده میزان نفوذ آب در خاک برای رسیدن به آب زیرزمینی است. اطلاعات مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی از مطالعات میدانی مربوط به محاسبات آزمایش پمپاژ به دست می‌آید [۲۴]. با توجه به آنکه در آزمایش‌های پمپاژ، مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال آب محاسبه می‌شود، با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع آبخوان به دست آمد. اطلاعات و نقاط جغرافیایی مربوط به ضریب قابلیت انتقال و ضخامت آبرفت دشت از نقشه‌های موجود تهیه شد. بعد از آماده‌سازی لایه‌ها و اطلاعات مورد نیاز دیگر مطابق جدول ۱ طبقه‌بندی پارامترهای دراستیک برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی منطقه مطالعه‌شده به کار گرفته شد.

در مدل DRASTIC شاخص نهایی حاصل ضرب ارزش عددی رتبه‌بندی‌شده هر پارامتر در وزن آن پارامتر است. برای مثال، پارامتر عمق آب زیرزمینی وزن ۵ اختصاص داده می‌شود و ارزش عددی رتبه‌های مختلف عمق آب زیرزمینی از ۱ تا ۱۰ تغییر می‌کند. بنابراین، شاخص DRASTIC حاصل از پارامتر عمق آب زیرزمینی از ۵ تا ۵۰ تغییر می‌کند [۱۷]. در انتها نیز بر اساس جدول ۲ کلاس‌بندی نقشه نهایی صورت گرفت.

تهیه نقشه شوری (EC) آب زیرزمینی

برای تهیه نقشه شوری از اطلاعات گرفته‌شده از شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان استفاده شد. این اطلاعات شامل مختصات چاه‌ها و میزان هدایت الکتریکی (EC) اندازه‌گیری‌شده در چاه‌هاست. شایان یادآوری است که برای هر چاه چندین نمونه طی سال موجود بود که از میانگین نمونه‌ها برای آنالیز استفاده شد. در ادامه، با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ در محیط نرم‌افزار ArcGIS نقشه رستری شوری آب زیرزمینی تهیه شد.

یا تغذیه خالص^۱، A یا محیط آبخوان^۲، S یا خاک^۳، T یا توپوگرافی، I یا محیط غیر اشباع^۴ و C یا هدایت هیدرولیکی است [۲۶].

عمق تا آب زیرزمینی بیان‌کننده عمق از سطح زمین تا سطح ایستابی است. برای تهیه لایه عمق از داده‌های اندازه‌گیری سطح ایستابی در ۱۰ پیژومتر منطقه با میانگین‌گیری برای یک دوره ۲۹ ساله (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷) استفاده شد. نقشه عمق سطح ایستابی منطقه مطالعه‌شده با درون‌یابی نقاط حاصل از میانگین عمق سطح ایستابی پیژومترها در محیط نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد. تغذیه خالص مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ می‌کند و به سطح ایستابی می‌رسد. در مدل دراستیک فرض بر این است که عمده‌ترین منبع تغذیه، ریزش‌های جوی هستند. برای تهیه لایه تغذیه خالص دشت ابتدا داده‌های تغذیه مربوط به ارتفاعات، بارندگی، رواناب و پساب که در رابطه بیلان و مطالعات قبلی این آبخوان بررسی شده بود، با هم جمع شد. سپس، از طریق رابطه ۱ که بر اساس دستورالعمل تهیه گزارش بیلان آب محدوده‌های مطالعاتی وزارت نیرو است، میزان تغذیه محاسبه شد [۲۷].

$$R = (H * R_h) / \bar{H} \quad (1)$$

که در رابطه یادشده R نقشه میزان تغذیه از سطح به میلی‌متر، H نقشه میزان هدایت هیدرولیکی و \bar{H} هدایت هیدرولیکی متوسط بر حسب متر بر روز و R_h ارتفاع خالص تغذیه بر حسب میلی‌متر است که با توجه به مجموع تغذیه و مساحت آبخوان به دست می‌آید.

محیط آبخوان بیان‌کننده خصوصیت میرایی^۵ مواد تشکیل‌دهنده آبخوان است. با استفاده از لوگ پیژومترها، لوگ چاه‌های اکتشافی موجود در منطقه، موقعیت جغرافیایی لوگ‌ها و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس محیط آبخوان مشخص شد.

لایه خاک نشان‌دهنده محیط خاک یا همان خاک سطحی است که در عمق ۱/۸ متری زمین قرار دارد. با توجه به نبود نقشه خاک از منطقه مطالعه‌شده، با استفاده از اطلاعات لوگ‌های حفاری دشت این لایه ترسیم شد.

1. Net Recharge
2. Aquifer Media
3. Soil Media
4. Impact of the Vadose Zone
5. Attenuation Characteristic

جدول ۱. رتبه‌های مربوط به پارامترهای مدل دراستیک در منطقه مطالعه شده

پارامتر	محدوده	رتبه	مساحت	درصد مساحت
عمق تا سطح ایستابی (متر)	۲۲/۵ - ۱۵	۳	۸۲۶/۷۷	۱۰/۸۹
	۳۰/۵ - ۲۲/۵	۲	۱۸۸۱/۵۴	۲۴/۷۸
	>۳۰/۵	۱	۴۸۸۲/۸۸	۶۴/۳۲
تغذیه (میلی‌متر)	۵۰ - ۲۲	۱	۷۸۹/۰۳	۱۰/۳۹
	۱۰۱ - ۵۰	۳	۲۸۰/۱۷	۳/۶۹
	۱۷۸ - ۱۰۱	۶	۶۵۵/۰۲	۸/۶۲
	۲۵۴ - ۱۷۸	۸	۱۴۰۷/۴۲	۱۸/۵۳
توپوگرافی (درصد)	>۲۵۴	۹	۴۴۶۰/۳۱	۵۸/۷۵
	۲ - ۰	۱۰	۹۵/۷۶	۱۱/۳۵
	۶ - ۲	۹	۳۹۱/۹۵	۴۶/۴۶
	۱۲ - ۶	۵	۲۹۱/۲۴	۳۴/۵۲
هدایت هیدرولیکی	۱۸ - ۱۲	۲	۵۱/۸۴	۶/۱۴
	>۱۸	۱	۱۲/۶۹	۱/۵۰
	<۴	۱	۷۰۶/۵۹	۹/۳۰
	۱۲ - ۴	۲	۳۶۵/۴۹	۴/۸۱
محیط غیر اشباع	۲۸ - ۱۲	۴	۱۷۰۲/۶۲	۲۲/۴۲
	۴۰ - ۲۸	۶	۱۳۹۳/۲	۱۸/۳۵
	۸۰ - ۴۰	۸	۲۳۱۰/۶۶	۳۰/۴۳
	>۸۰	۱۰	۱۱۱۳/۳۹	۱۴/۶۶
محیط خاک	رس و سیلت	۲	۹۴۲/۴۸	۱۲/۴۱
	ماسه و سیلت	۵	۲۴۳۶/۲۱	۳۲/۰۸
	شن و ماسه	۶	۱۳۸۷/۴۴	۱۸/۲۷
	شنی سنگی	۷	۲۸۲۵/۸۲	۳۷/۲۲
محیط آبخوان	سیلتی	۳	۲۴۸۶/۷	۳۲/۷۵
	سیلتی لومی	۴	۲۵۹۱/۶۴	۳۴/۱۳
	لومی شنی	۵	۹۴۲/۱۲	۱۲/۴۰
محیط آبخوان	شن متوسط	۷	۱۸۳۷/۸۹	۲۴/۲۰
	شن درشت	۸	۲۲۷۱/۴۲	۲۹/۹۱
	گراول و شن	۹	۳۴۸۲/۶۴	۴۵/۸۷

جدول ۲. رتبه پتانسیل آسیب‌پذیری براساس مقادیر شاخص دراستیک

رتبه	پتانسیل آلودگی	شاخص دراستیک
۰	آسیب‌پذیری قابل اغماض	۴۶-۲۳
۱	آسیب‌پذیری کم	۹۲-۴۷
۲	آسیب‌پذیری متوسط	۱۳۶-۹۳
۳	آسیب‌پذیری زیاد	۱۸۴-۱۳۷
۴	آسیب‌پذیری خیلی زیاد	۲۳۰-۱۸۴

تهیه نقشه احتمال خطر شوری

الف) روش استفاده شده

از اطلاعات اندازه‌گیری شده EC به وسیله سازمان آب منطقه‌ای برای تهیه نقشه احتمال خطر شوری استفاده شد. بر این اساس، طبق بررسی منابع صورت‌گرفته و بر اساس روش ویلکوکس [۲۸] یک مقدار آستانه تعریف شد. از آنجا که بر اساس روش ویلکوکس EC بزرگ‌تر یا مساوی ۲۲۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر یک حد آستانه برای شوری به منظور آبیاری کشاورزی است [۲۹]، بنابراین چاه‌ها در دو گروه تقسیم شد: چاه‌های با EC کمتر از این مقدار و چاه‌های با EC بزرگ‌تر یا مساوی این مقدار.

سپس، از سه الگوریتم یادگیری ماشین به نام‌های جنگل تصادفی^۱، افزایش گرادیدان اکستریم (XGBoost)^۲ و درخت‌های رگرسیون جمع‌شده بی‌زی (BART)^۳، برای پیش‌بینی مکانی شوری در سطح کل آبخوان استفاده شد. شایان یادآوری است از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و از ۳۰ درصد داده‌ها به منظور اعتبارسنجی استفاده شد [۳۰]. به‌منظور ارزیابی مدل‌ها با استفاده از مساحت زیرمنحنی (AUC) در منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) قدرت پیش‌بینی مدل و با استفاده از شاخص سطح سلول هسته^۴ (SCAI) دقت تفکیک بین طبقات بررسی شد. رابطه کمی-کیفی بین AUC و دقت پیش‌بینی که دامنه بین ۰/۵ تا ۱ را شامل می‌شود به شرح ذیل است: ۰/۹-۱ دقت عالی، ۰/۸-۰/۹ دقت خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ دقت خوب، ۰/۶-۰/۷ دقت متوسط و ۰/۵-۰/۶ دقت ضعیف. در نهایت، نتایج این سه مدل بر اساس رابطه ۲ ترکیب شده و نقشه نهایی احتمال وقوع خطر شوری به دست می‌آید.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^3 (Auc_i * m_i)}{\sum_{i=1}^3 Auc_i} \quad (2)$$

که در این رابطه Auc_i میزان مساحت زیر منحنی ROC هر یک از روش‌ها است و همچنین m_i لایه رستری خطر شوری هر یک از مدل‌هاست. عدد ۳ نیز نشان‌دهنده استفاده از ۳ روش در تحقیق حاضر است.

ب) پارامترهای در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی

در پژوهش حاضر ۱۲ متغیر شامل لایه‌های درصد شیب،

جهت شیب، انحنای مقطع^۵ و انحنای توپوگرافیک^۶، انحنای کلی، فاکتور طول و تنیدی شیب یا LS، شاخص قدرت جریان یا SPI، شاخص رطوبت توپوگرافیک یا TWI^۷، کاربری، بافت خاک، شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی یا NDVI و مدل رقومی ارتفاع با توجه به استفاده از تجربیات کارشناسان و پژوهشگران در بررسی‌های صورت‌گرفته، در منطقه مطالعه شده استفاده شد. انتخاب این لایه‌ها بر اساس مرور منابع و تحقیقات پیشین است. برای نمونه، ساجدی حسینی و همکاران [۳۱] از لایه‌های شاخص رطوبت توپوگرافیک، فاصله از رودخانه، ارتفاع و تراکم زهکشی برای بررسی ریسک آلودگی نترات استفاده کرده‌اند. شایان یادآوری است به کار نبردن لایه‌هایی مانند عمق آب زیرزمینی به علت استفاده این لایه‌ها در قسمت بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری (مدل دراستیک) است و بنابراین، نیاز به استفاده مجدد نیست. ابتدا، شاید به نظر برسد که بین بعضی از این ۱۲ پارامتر و شوری آب زیرزمینی رابطه مستقیمی وجود ندارد، اما از آنجا که این پارامترها می‌توانند به صورت غیرمستقیم بر شوری و کیفیت آبخوان تأثیرگذار باشند، بنابراین مدل‌های داده‌کاوی خواهند توانست این الگوهای پنهان بین شوری و پارامترهای بررسی شده را پیدا کنند.

داده‌های ماهواره‌ای SRTM با قدرت تفکیک ۹۰ متر به منظور تهیه مدل رقومی ارتفاعی در منطقه مطالعاتی استفاده شد. طبقات ارتفاعی مختلف سبب ایجاد شرایط اقلیمی متفاوت شده و در نتیجه سبب ایجاد خاک و نوع پوشش گیاهی متفاوت می‌شود [۳۲]. ارتفاع منطقه مطالعاتی از ۲/۲۹ تا ۶/۸۱ متر متغیر است.

شیب بیشتر فرایند تغذیه آب‌های زیرزمینی، نفوذ و رواناب را کنترل می‌کند [۳۲]، بنابراین یک فاکتور مؤثر در بحث آلودگی آب‌های زیرزمینی است. نقشه شیب بر اساس مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از ابزار Spatial Analysis در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. جهت شیب وابسته به جهت عمده بارش و روند فیزیوگرافیک است و روی میزان دریافت بارش و نوع پوشش گیاهی تأثیرگذار است [۳۳]. نقشه جهت شیب از مدل رقومی ارتفاعی استخراج شد.

5. Profile curvature
6. Plan curvature
7. Topographic Wetness Index

1. Random Forest
2. Extreme Gradient Boosting
3. Bayesian Additive Regression Trees
4. Seed Cell Area Index

که در آن As مساحت ویژه منطقه (مترمربع) و ϵ درجه شیب است.

برای تهیه لایه کاربری و بافت خاک نیز از نقشه‌های سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری استفاده شد. شاخص NDVI نیز به وسیله تصاویر لندست مربوط به منطقه مطالعه شده تهیه شد. در شکل ۲ نقشه عوامل ورودی مشخص است.

بعد از آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی در نظر گرفته‌شده و نیز لایه اطلاعات نقطه‌ای چاه‌ها، ابتدا برای تعیین هم‌خطی از پارامترهای Tolerance یا ضریب تحمل و VIF یا عامل تورم واریانس استفاده شد. در ادامه، به معرفی مختصر مدل‌های استفاده‌شده پرداخته می‌شود.

ج) الگوریتم افزایش گرادیان اکستریم (XGBoost)

الگوریتم XGBoost که توسط چن و گواسترین در سال ۲۰۱۶ پیشنهاد شده است، نوعی تکنیک اجرایی کارآمد برای افزایش صحت و عملکرد ماشین افزایش گرادیان (GBM) و به‌خصوص افزایش دقت طبقه‌بندی درخت‌های رگرسیون است. به خاطر پردازش منظم و موازی، XGBoost در مقایسه با GBM عملکرد بهتری دارد [۳۹]. این الگوریتم برای آموزش بهتر، تمام فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده را هم‌زمان ترکیب می‌کند [۴۰].

د) الگوریتم جنگل تصادفی

این الگوریتم را نخستین بار لئو برایمن و آدل کاتلر ایجاد کردند و توسعه دادند. الگوریتم جنگل تصادفی مبتنی بر دسته‌ای از درخت‌های تصمیم است و در حال حاضر یکی از بهترین الگوریتم‌های یادگیری است. مدل پیش‌بینی‌کننده RF بر اساس میانگین‌گیری از نتایج حاصل از تمامی درخت‌های تصمیم مربوطه استوار است و برای بسیاری از مجموعه داده‌ها، طبقه‌بندی با صحت زیادی را انجام می‌دهد. درختان تصادفی با در نظر گرفتن بردار ورودی، آن را با هر درخت در جنگل طبقه‌بندی کرده و خروجی، برچسب‌های کلاسی هستند که از اکثریت آرا دریافت شده است. در این مدل از دو عامل میانگین کاهش دقت و میانگین کاهش جینی برای تعیین اولویت تأثیر هر یک از عوامل مؤثر استفاده می‌شود [۴۱].

انحنای سطح روی همگرایی و واگرایی جریان تأثیر می‌گذارد و انحنای مقطع مطابق با جهت حداکثر شیب است و بیشتر روی سرعت جریان در سطح تأثیرگذار است [۳۴]. نقشه انحنای توپوگرافیک، انحنای مقطع و انحنای کلی با استفاده از مدل رقومی و در محیط نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شد. انحنای توپوگرافیک به ۳ کلاس مقعر، هموار و محدب تقسیم‌بندی می‌شود. مقادیر منفی انحنای توپوگرافیک بیانگر تقعر و مقادیر مثبت آن بیانگر تحدب سطح است. مقادیر صفر نشان‌دهنده هموار بودن سطح است [۳۵]. انحنای مقطع نیز به ۳ کلاس تقسیم می‌شود.

شاخص قدرت جریان (SPI) گویای میزان قدرت فرساینده‌گی جریان آب است. بر این اساس، آبگذری متناسب است با مساحت ویژه حوضه و شیب، که با استفاده از رابطه ۳ و توسط نرم‌افزار SAGA GIS محاسبه شد [۳۶].

$$SPI = B_s * tana \quad (3)$$

که در آن B_s مساحت منطقه به مترمربع و $tana$ شیب محلی به درجه است.

برای محاسبه فاکتور LS ابتدا نقشه شیب منطقه بر حسب درجه تهیه شد. سپس، مدل رقومی توسط ابزار پرکننده گودی‌ها^۱ اصلاح شد و از مدل رقومی اصلاح‌شده نقشه رستری جهت جریان^۲ استخراج و در نهایت از آن نقشه رستری تجمع جریان^۳ برای کل منطقه به دست آمد. رابطه ۴ برای محاسبه عامل LS در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد [۳۷].

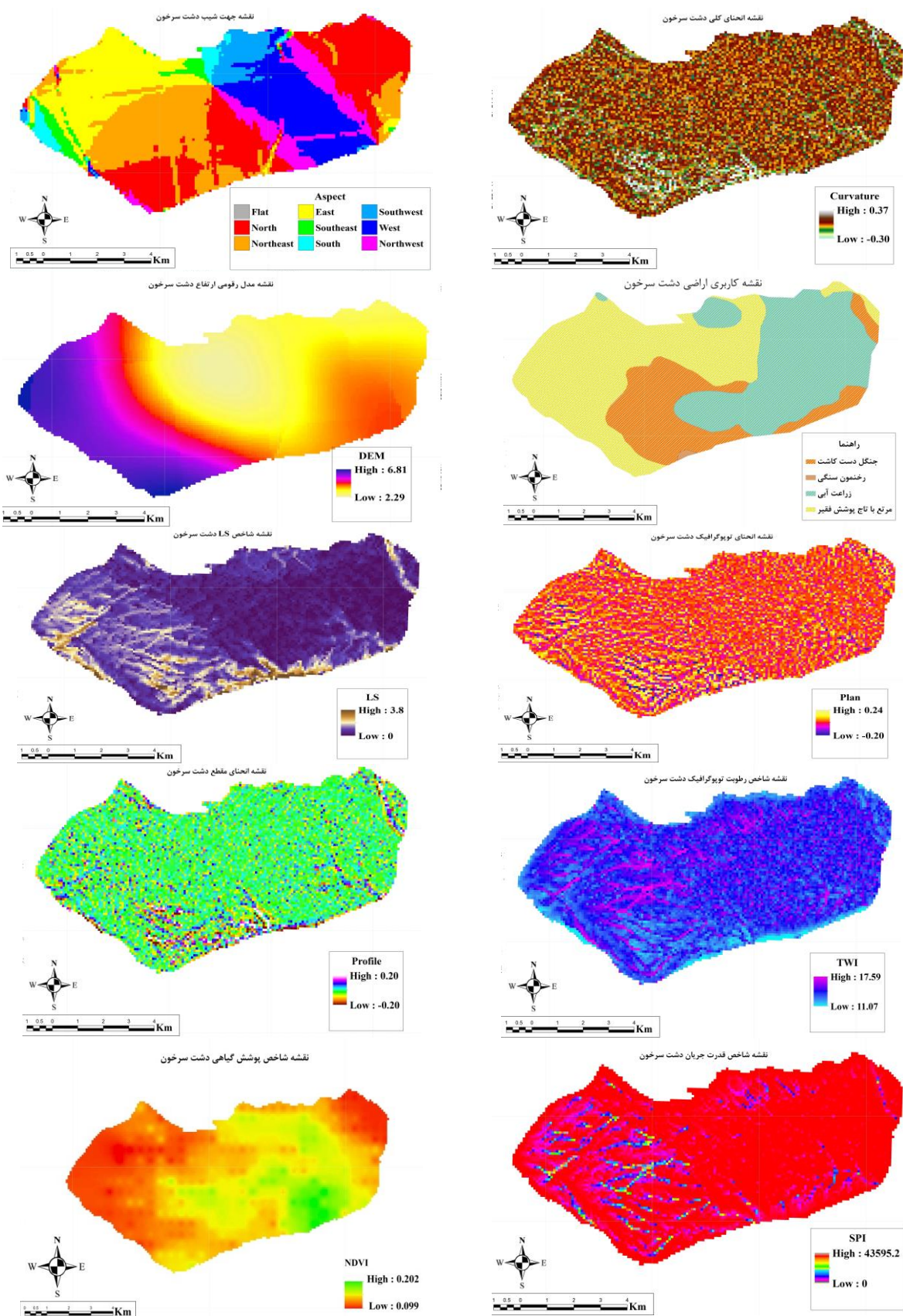
$$LS = (1.4) [Fac * 10/a_0]^{0.4} [\sin \beta(r)/\sin b_0]^{1.4} \quad (4)$$

که در آن Fac نقشه رستری جریان تجمعی منطقه، β (r) زاویه شیب بر حسب درجه، a_0 طول کرت استاندارد (که برابر با ۲۲/۱۳ متر است)، b_0 شیب کرت استاندارد (که برابر با ۵/۱۴۳ درجه) است.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی روی میزان سطوح اشباع برای تولید رواناب است که توسط معادله ۵ محاسبه می‌شود [۳۸].

$$TWI = Ln(As/tan\epsilon) \quad (5)$$

1. Fill Sinks
2. Flow Direction
3. Flow Accumulation



شکل ۲. نقشه‌های عوامل مؤثر بر وضعیت آبخوان سرخون

خواهد بود. بعد از اعمال موارد یادشده بازه شاخص آسیب‌پذیری منطقه (۱۰۰-۱۶۸)، مطابق طبقه‌بندی جدول ۲ و در سه گروه آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد. نتایج مربوط به محاسبات مدل دراستیک در شکل ۳ آورده شده است. به طور کلی، قسمت‌های مرکزی و غربی آبخوان پتانسیل بیشتری از نظر آسیب‌پذیری دارند و قسمت شرق دشت از میزان آسیب‌پذیری کاسته می‌شود. قسمت کوچکی از منطقه در شمال غربی نیز آسیب‌پذیری متوسط دارد. با توجه به پارامترهای هیدروژئولوژیکی مؤثر بر آسیب‌پذیری آبخوان به دلایلی از جمله زیاد بودن میزان تغذیه، هدایت هیدرولیکی، جنس درشت‌دانه محیط آبخوان، در بخش مرکزی و غربی دشت، مکان‌های با آسیب‌پذیری زیاد در این بخش آبخوان قرار گرفته است. از نظر وسعت ۱۳ درصد از منطقه مطالعه‌شده در محدوده آسیب‌پذیری کم، ۳۸ درصد آسیب‌پذیری متوسط، ۴۹ درصد در محدوده آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

نتایج پهنه‌بندی شوری آبخوان

همان‌طور که در قسمت مواد و روش‌ها توضیح داده شد، بعد از کسب اطلاعات اولیه و داده‌های شوری نمونه‌های آب زیرزمینی با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ در محیط نرم‌افزار ArcGIS نقشه رستری شوری آب زیرزمینی تهیه شد (شکل ۲).

همان‌طور که در نقشه تغییرات شوری نمایان است، هر چه از سمت غرب به سمت شرق آبخوان حرکت کنیم بر میزان شوری افزوده می‌شود. کمترین و بیشترین میزان شوری آب زیرزمینی به ترتیب برابر با ۷۰۶ و ۸۸۰۹ میکروموس بر سانتی‌متر است. میانگین شوری نیز ۳۴۳۸ میکروموس بر سانتی‌متر است. بر اساس روش ویلکوکس قسمت‌های شرقی آبخوان کیفیت نامطلوب برای آبیاری دارند و قسمت‌های غربی دارای کیفیت بهتری برای کشاورزی است.

نتایج تهیه نقشه احتمال خطر شوری

الف) تهیه نقشه عوامل مؤثر

همان‌طور که در مراحل قبل گفته شد، در پژوهش حاضر ۱۲ متغیر از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بحث آب زیرزمینی شامل درصد شیب، جهت شیب، انحنای مقطع، انحنای توپوگرافیک، انحنای کلی، فاکتور LS، شاخص قدرت

ه) الگوریتم درختان رگرسیون جمع‌شده بیزی (BART) الگوریتم BART از جمله روش‌هایی است که دربرگیرنده مجموعه‌ای از درختان رگرسیون است. در واقع، BART یک مدل رگرسیون ناپارامتری بیزی است که بر اساس یک مدل آماری شامل تابع مدل درست‌نمایی و توزیع پیشین مشخص و برازش مدل بر اساس الگوریتم مونت‌کارلوی زنجیره مارکوفی یا MCMC انجام می‌شود. روش BART امکان استنباط کامل روی توزیع پسین شامل برآورد نقطه‌ای و فاصله‌ای برای تابع نامعلوم رگرسیونی در کنار برآورد اثرهای حاشیه‌ای پیشگوهای بالقوه را فراهم می‌آورد. همچنین، از مدل BART می‌توان برای انتخاب متغیرهای تأثیرگذار در کنار انجام پیش‌بینی متغیر هدف بهره برد [۴۲].

تهیه نقشه ریسک شوری آب زیرزمینی

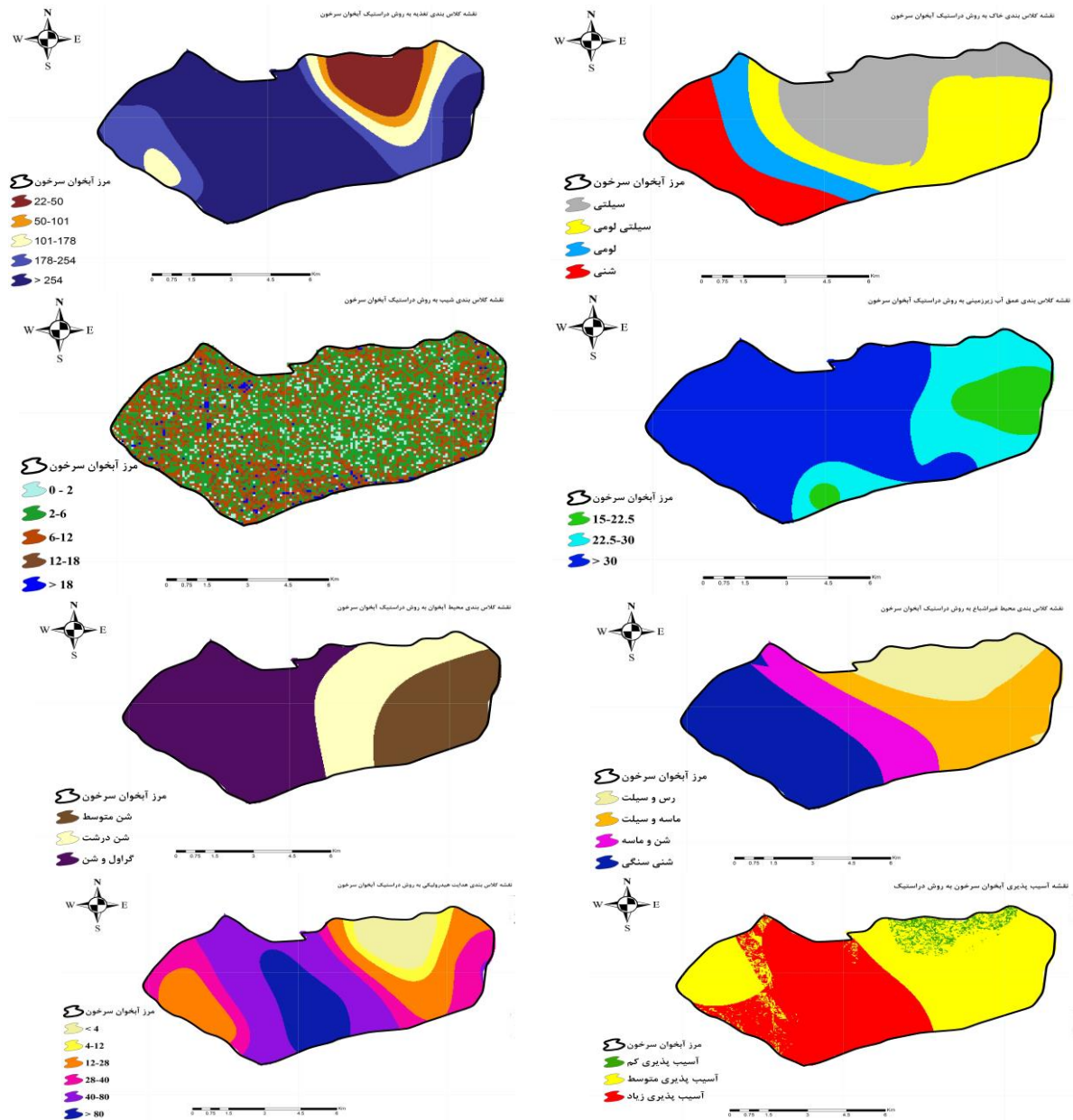
ریسک به عنوان یک فرایند برای تخمین احتمال وقوع در یک رویداد خاص با مجموعه‌ای از شرایط خاص تعریف می‌شود [۴۳]. ریسک شوری آب زیرزمینی را می‌توان با هم‌پوشانی لایه‌های آسیب‌پذیری آبخوان، احتمال خطر و شوری آب زیرزمینی از طریق رابطه ۶ به دست آورد [۴۴]. در پژوهش حاضر لایه شوری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان سرخون و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. لایه مربوط به احتمال خطر شوری نیز با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین که در قسمت قبل توضیح داده شد، تهیه شد.

$$Risk = Vulnerability * Salinity * Probability \quad (6)$$

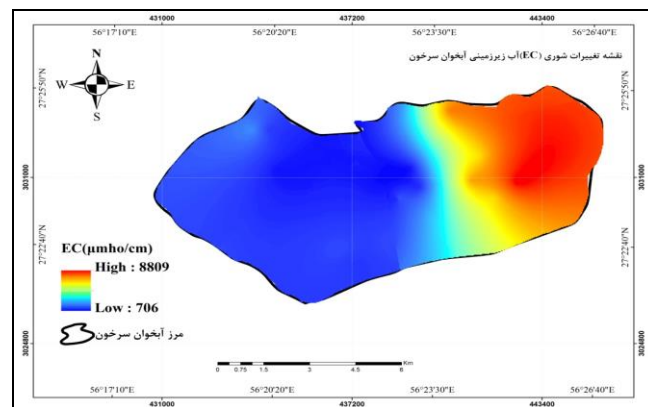
نتایج

نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان

همان‌طور که در مرحله قبل گفته شد، هفت عامل مؤثر در مدل دراستیک تهیه شد. در مدل دراستیک شاخص نهایی حاصل ضرب ارزش عددی رتبه‌بندی‌شده هر پارامتر در وزن آن پارامتر است. برای تبدیل شاخص دراستیک به درجات مختلف آسیب‌پذیری کافی است ارزش عددی رتبه‌های هر پارامتر به پنج قسمت (۱-۲، ۲-۴، ۴-۶، ۶-۸، ۸-۱۰) تقسیم شده و در وزن پارامتر ضرب شود. حاصل جمع تمامی پارامترها برای هر قسمت بیانگر درجات آسیب‌پذیری



شکل ۳. نقشه پارامترهای ورودی و نقشه نهایی مدل دراستیک



شکل ۴. نقشه تغییرات شوری (EC) آب زیرزمینی آبخوان سرخون

جریان، شاخص رطوبت توپوگرافیک، کاربری، بافت خاک، شاخص NDVI و مدل رقومی ارتفاع با توجه به استفاده از تجربیات کارشناسان و پژوهشگران در بررسی‌های صورت‌گرفته، در نظر گرفته شد و لایه GIS مربوط به این عوامل به وسیله روش‌های گفته‌شده در قسمت‌های قبل تهیه شد که نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. شایان یادآوری است از آوردن نقشه شیب و خاک به علت تکرار در لایه‌های ورودی مدل دراستیک صرف‌نظر می‌شود.

ب) تست هم‌خطی متغیرهای مؤثر

اگر در جریان شبیه‌سازی بین پارامترها هم‌خطی وجود داشته باشد، دقت پیش‌بینی مدل کاهش می‌یابد، در نتیجه بررسی تست هم‌خطی بین پارامترهای مؤثر ضروری است. در پژوهش حاضر برای تعیین هم‌خطی از پارامترهای Tolerance یا ضریب تحمل و VIF یا عامل تورم واریانس استفاده شده است. ضریب تحمل معادل صفر برای یک

متغیر به این معناست که این متغیر از طریق متغیرهای مستقل دیگر به طور کامل قابل پیش‌بینی است و بنابراین هم‌خطی کامل وجود دارد. اگر مقدار ضریب تحمل متغیری مساوی یک باشد، مشخص می‌شود که متغیر مد نظر با سایر متغیرهای مستقل کاملاً ناهمبسته است. اگر مقدار ضریب تحمل کمتر از ۰/۱ و مقدار عامل تورم واریانس بزرگ‌تر از ۱۰ باشد، بین پارامترها هم‌خطی وجود دارد [۴۵]. برای محاسبه تست هم‌خطی مقادیر عددی هر یک از پارامترها در محل چاه‌های نمونه‌برداری شده، استخراج شده و در محیط SPSS تست هم‌خطی محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تست در جدول ۳ ارائه شده است. از آنجا که هیچ‌یک از متغیرهای انتخاب‌شده ضریب تحمل کمتر از ۰/۱ ندارند و همچنین بیشترین مقدار مشاهده‌شده برای عامل تورم واریانس ۲/۲۰۳ (کوچک‌تر از ۱۰) است، بنابراین هم‌خطی بین متغیرها وجود ندارد.

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های ضریب تحمل و تورم واریانس برای هر یک از پارامترهای مستقل

عامل	ضریب تحمل (Tolerance)	عامل تورم واریانس (VIF)
جهت شیب	۰/۸۲۵	۱/۲۱۲
انحنای کلی	۱/۸۹۸	۱/۱۱۴
کاربری اراضی	۰/۸۲۰	۱/۲۱۹
شاخص LS	۰/۷۵۸	۱/۳۱۹
انحنای توپوگرافیک	۰/۷۳۰	۱/۳۷۰
انحنای مقطع	۰/۸۲۵	۱/۲۱۲
درصد شیب	۰/۵۴۴	۱/۹۶۰
خاک	۰/۹۴۰	۱/۰۶۴
شاخص قدرت جریان	۰/۶۶۸	۱/۴۹۷
شاخص رطوبت توپوگرافیک	۰/۹۰۱	۱/۱۷۶
مدل رقومی ارتفاع	۰/۴۵۴	۲/۲۰۳
شاخص NDVI	۰/۷۵۷	۱/۳۲۰

ج) نقشه‌های احتمال خطر شوری آب زیرزمینی

بعد از آماده‌سازی لایه‌ها و اطلاعات اولیه از ۷۰ درصد نمونه‌ها (چاه‌های موجود در شکل ۱) برای آموزش مدل‌ها استفاده شد و نقشه‌های احتمال خطر شوری (از صفر تا یک) به وسیله مدل‌های یادگیری ماشین تهیه شد. شایان یادآوری است که تمامی مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار R و با استفاده از بسته Caret انجام گرفت. پس از مدل‌سازی نقشه‌های رستری تولیدشده وارد نرم‌افزار ArcMap شده و با استفاده از دستورات Natural Breaks (Jenks) یا شکست‌های طبیعی به ۴ کلاس احتمال خطر شوری کم

(۰-۰/۲۵)، احتمال خطر شوری متوسط (۰/۲۵-۰/۵)، احتمال خطر شوری زیاد (۰/۵-۰/۷۵) و احتمال خطر شوری خیلی زیاد (۰/۷۵-۱) تقسیم‌بندی شد که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است.

د) ارزیابی مدل‌های استفاده‌شده

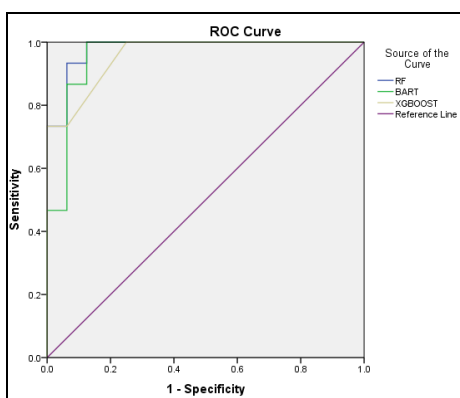
پس از تهیه لایه‌های احتمال خطر شوری با استفاده از مدل‌های استفاده‌شده، از ۳۰ درصد چاه‌های نمونه‌برداری برای اعتبارسنجی و ارزیابی استفاده شد. برای این امر چاه‌های اعتبارسنجی را روی لایه‌های احتمال خطر شوری انداخته و مقادیر ارزش هر لایه استخراج شد و برای تهیه

زیرمنحنی (AUC) و سایر اطلاعات منحنی‌های ROC در جدول ۴ آورده شده است.

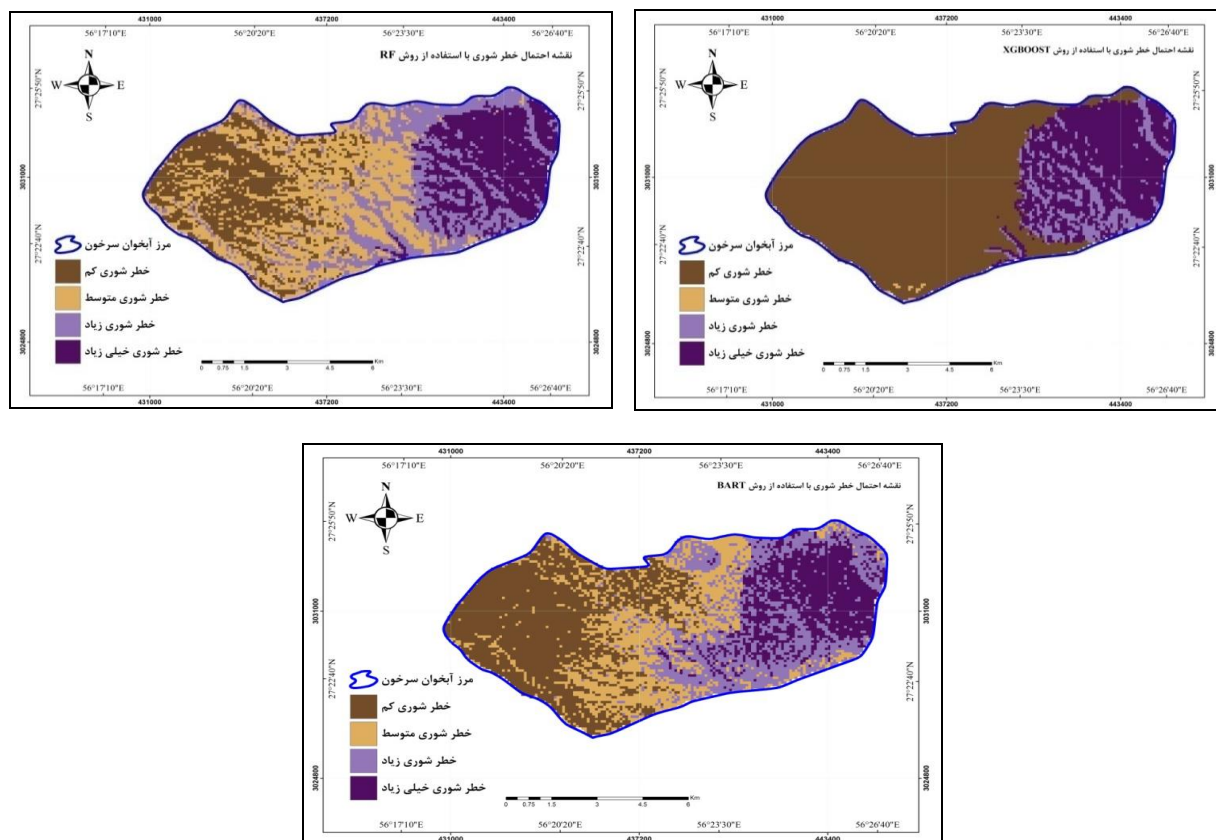
منحنی ROC به نرم‌افزار SPSS منتقل شد که منحنی‌های ROC در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین، مساحت

جدول ۴. اطلاعات مربوط به منحنی ROC مدل‌های استفاده‌شده

مدل استفاده‌شده	مساحت زیرمنحنی (AUC)	انحراف معیار	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
			حد پایین	حد بالا
RF	۰/۹۷۹	۰/۰۲۱	۰/۹۳۹	۱
BART	۰/۹۵۸	۰/۰۳۶	۰/۸۸۸	۱
XGBoost	۰/۹۶۸	۰/۰۳۱	۰/۸۹۹	۱



شکل ۵. منحنی ROC مربوط به مدل‌های استفاده‌شده



شکل ۶. نقشه‌های احتمال خطر شوری آبخوان سرخون

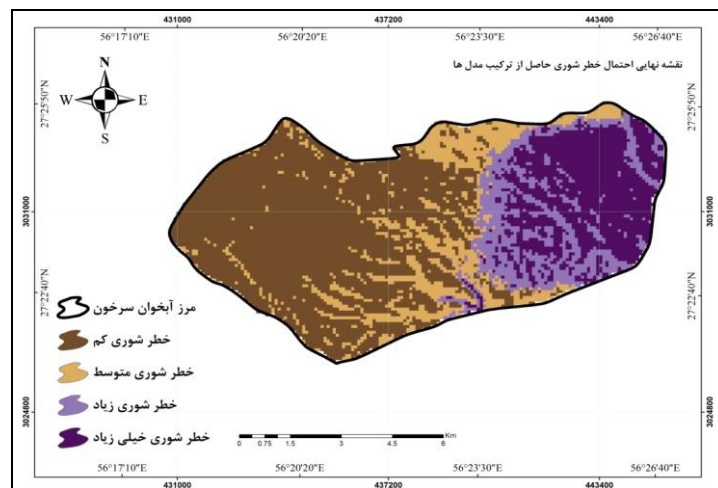
داشته، در انتها برای ارائه یک نقشه نهایی این چهار مدل بر اساس میزان AUC خود، از طریق رابطه ۲، ترکیب شدند که نقشه نهایی خطر شوری در شکل ۷ آورده شده است.

و) ارزیابی ریسک شوری آبخوان

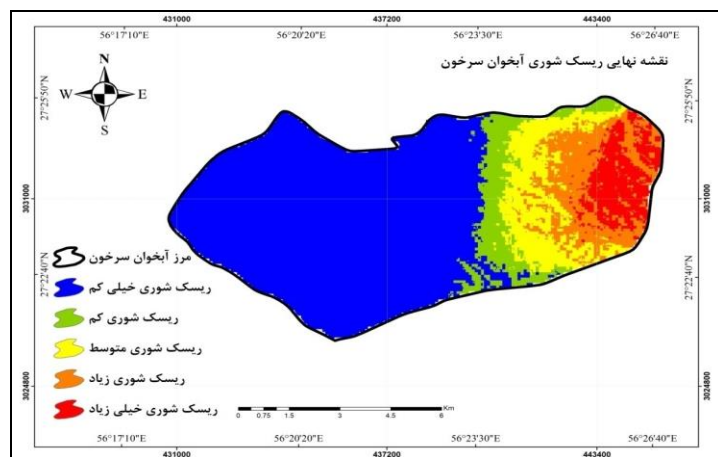
بعد از آماده‌سازی نقشه آسیب‌پذیری، نقشه تغییرات شوری (EC) و نقشه احتمال خطر شوری، نقشه ریسک شوری با استفاده از رابطه ریسک در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد (شکل ۸). سپس، نقشه ریسک به پنج طبقه ریسک بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شد که مساحت هر یک از این طبقات به ترتیب برابر با ۴۷۸۹، ۶۱۹، ۷۹۲، ۷۷۴ و ۴۸۰ هکتار به دست آمد. همان‌طور که از شکل ۸ نمایان است، قسمت‌های شرقی ریسک شوری بسیار زیاد دارد که علت این امر تمرکز زیاد زمین‌های کشاورزی در این محدوده است.

همان‌طور که از جدول ۴ و منحنی ROC مدل‌های استفاده‌شده مشخص است هر ۳ مدل استفاده‌شده از نظر میزان AUC عملکرد عالی (AUC بالای ۰/۹) در پیش‌بینی مکانی خطر شوری دارند و انتخاب مدل بهتر قدری مشکل است. با این وجود، مدل جنگل تصادفی با داشتن حداکثر AUC و کمترین میزان انحراف معیار بهتر عمل کرده است. در بین دو مدل XGBoost و BART نیز مدل XGBoost عملکرد بهتری داشته است. نتایج نقشه‌های احتمال (خطر شوری) نشان می‌دهد دو مدل BART و جنگل تصادفی مشابه هم عمل کرده‌اند و روش XGBoost با این دو مدل از نظر مکانی متفاوت عمل کرده، که بی‌شک به دلیل ذات ریاضی متفاوت هر یک از مدل‌هاست.

ه) ترکیب نتایج مدل‌ها و تهیه نقشه احتمال نهایی
با توجه به اینکه هر سه روش استفاده‌شده عملکرد بسیار خوبی



شکل ۷. نقشه نهایی احتمال خطر شوری آبخوان سرخون



شکل ۸. نقشه ریسک شوری آبخوان سرخون

بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی ریسک شوری ابزار مفیدی برای مدیریت منابع آب به‌خصوص در نواحی خشک و نیمه‌خشک و مناطق ساحلی است. در این پژوهش تلاش شد، چارچوب جامع و کاملی برای ارزیابی ریسک شوری توسعه داده شود. برای این امر ابتدا با استفاده از روش دراستیک استاندارد آسیب‌پذیری آبخوان سرخون بررسی شد. نتایج تحلیل آسیب‌پذیری نشان داد قسمت‌های مرکزی و غربی آبخوان پتانسیل بیشتری از نظر آسیب‌پذیری دارند و قسمت شرق دشت از میزان آسیب‌پذیری کاسته می‌شود. قسمت کوچکی از منطقه در شمال غربی نیز آسیب‌پذیری متوسطی دارد. با توجه به پارامترهای هیدروژئولوژیکی مؤثر بر آسیب‌پذیری آبخوان به دلایلی از جمله زیاد بودن میزان تغذیه، هدایت هیدرولیکی، جنس درشت‌دانه محیط آبخوان، در بخش مرکزی و غربی دشت، مکان‌های با آسیب‌پذیری بسیار زیاد در این بخش (۴۹ درصد از مساحت آبخوان) قرار گرفته است.

بر اساس نقشه به‌دست‌آمده برای تغییرات مکانی شوری مشخص شد که کمترین میزان شوری آب زیرزمینی برابر با ۷۰۶ میکروموس بر سانتی‌متر در قسمت غرب آبخوان و بیشترین میزان شوری برابر با ۸۸۰۹ میکروموس بر سانتی‌متر در قسمت شرق آبخوان است. بر اساس روش ویلکوکس قسمت‌های شرقی آبخوان کیفیت نامطلوبی برای آبیاری دارند و قسمت‌های غربی دارای کیفیت بهتری به منظور کشاورزی هستند. علت این امر تمرکز زیاد زمین‌های کشاورزی و دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن در قسمت‌های شرقی است.

با توجه به اینکه هر سه مدل یادگیری ماشین استفاده‌شده عملکرد عالی (AUC بیش از ۰/۹) داشتند، نتایج هر سه مدل با یکدیگر ترکیب شده و یک نقشه واحد احتمال خطر شوری تهیه شد. در انتها نیز نقشه ریسک شوری آبخوان سرخون از طریق ترکیب سه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان، نقشه تغییرات شوری و نقشه احتمال وقوع خطر به‌دست آمد. شایان یادآوری است بیشتر تحقیقات قبلی [۱۶ و ۱۷] فقط از طریق مدل‌های آسیب‌پذیری، خطرات شوری را بررسی کردند. اما در تحقیق حاضر مدل آسیب‌پذیری با مدل‌های یادگیری ماشین ترکیب شده و ریسک شوری محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد قسمت‌های شرقی ریسک شوری بسیار زیاد دارد که علت این امر تمرکز زیاد زمین‌های

کشاورزی در این محدوده است. منبع اصلی آب کشاورزی در این دشت آب زیرزمینی است. نتایج بازدید محلی از منطقه مطالعه‌شده نشان داد تعداد ۳۲ دستگاه آب‌شیرین‌کن کشاورزی در قسمت شرقی آبخوان موجود است، که پساب این دستگاه‌ها در سطح زمین رهاسازی می‌شود، که به‌طبع این پساب بعد از مدتی به سطح آب زیرزمینی رسیده و سبب افزایش شوری بسیار زیاد سفره آب زیرزمینی می‌شود. به همین علت است که قسمت‌های شرقی آبخوان ریسک شوری زیاد دارد. هم‌پوشانی نقشه کاربری با نقشه ریسک نشان می‌دهد اراضی زراعت آبی ریسک شوری بسیار زیاد دارد که این نتیجه با یافته‌های مَتزئو و همکاران [۱۸] مطابق است. ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از طریق بازبازرسی میدانی نشان داد روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر برای ارزیابی ریسک شوری (آلودگی) آبخوان مناسب است. برزگر و همکاران [۲۲] و ساجدی حسینی و همکاران [۲۹] نیز عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین را برای این منظور مناسب ارزیابی کرده‌اند.

نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر می‌تواند به برنامه‌ریزان و مسئولان محلی برای ارزیابی ریسک سیاست‌های گرفته‌شده برای مدیریت آب زیرزمینی کمک کند. البته، مطالعه حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد که اشاره به این موارد می‌تواند برای مطالعات بعدی راهگشا باشد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به نقشه خاک اشاره کرد. با توجه به تأثیر بسیار زیاد فاکتور خاک هم در بحث پتانسیل آسیب‌پذیری و هم در بحث خطر و ریسک، بهتر است در مطالعات بعدی از نقشه‌های با دقت بیشتری استفاده شود و نیاز است که از منطقه مطالعه شده پروفیل‌های خاک بیشتری در دسترس باشد. همچنین، وجود نمونه‌های بیشتر آب زیرزمینی در فصول و ماه‌های مختلف سال امکان تحلیل زمانی ریسک شوری را نیز فراهم می‌آورد.

منابع

- [1]. Abd-Elhamid HF, Javadi AA. A cost-effective method to control seawater intrusion in coastal aquifers. *Water resources management*. 2011 Sep 1; 25(11):2755-80.
- [2]. Kaliraj S, Chandrasekar N, Peter TS, Selvakumar S, Magesh NS. Mapping of coastal aquifer vulnerable zone in the south west coast of Kanyakumari, South India, using GIS-based DRASTIC model. *Environmental monitoring and assessment*. 2015 Jan 1; 187(1):4073.

- [3]. Kazakis N, Pavlou A, Vargemezis G, Voudouris KS, Soulios G, Pliakas F, Tsokas G. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece. *Science of the Total Environment*. 2016 Feb 1; 543:373-87.
- [4]. Anders R, Mendez GO, Futa K, Danskin WR. A geochemical approach to determine sources and movement of saline groundwater in a coastal aquifer. *Groundwater* 52, 756-768.
- [5]. Han DM, Song XF, Currell MJ, Yang JL, Xiao GQ. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China. *Journal of Hydrology*. 2014 Jan 16; 508:12-27.
- [6]. Stigter TY, Ribeiro L, Dill AC. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*. 2006 Jan 1; 14(1-2):79-99.
- [7]. Johnson TD, Belitz K. Assigning land use to supply wells for the statistical characterization of regional groundwater quality: correlating urban land use and VOC occurrence. *Journal of Hydrology*. 2009 May 30; 370(1-4):100-8.
- [8]. McLay CD, Dragten R, Sparling G, Selvarajah N. Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. *Environmental Pollution*. 2001 Dec 1; 115(2):191-204.
- [9]. van Beynen PE, Niedzielski MA, Bialkowska-Jelinska E, Alsharif K, Matusick J. Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography*. 2012 Mar 1; 32(2):868-77.
- [10]. Aller L, Lehr JH, Petty R. DRASTIC: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National water well Association Worthington, Ohio 43085. Truman Bennett. Bennett and Williams. Inc. Columbus, Ohio. 1987; 43229.
- [11]. Foster SS. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research. Netherlands Organization for Applied Scientific Research; 1987.
- [12]. Zhou J, Li G, Liu F, Wang Y, Guo X. DRAV model and its application in assessing groundwater vulnerability in arid area: a case study of pore phreatic water in Tarim Basin, Xinjiang, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*. 2010 May 1; 60(5):1055-63.
- [13]. Nobre RC, Rotunno Filho OC, Mansur WJ, Nobre MM, Cosenza CA. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2007 Dec 7; 94(3-4):277-92.
- [14]. Iqbal J, Gorai AK, Tirkey P, Pathak G. Approaches to groundwater vulnerability to pollution: a literature review. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2012 Jan 1; 9(1):105-15.
- [15]. Anane M, Abidi B, Lachaal F, Limam A, Jellali S. GIS-based DRASTIC, Pesticide DRASTIC and the Susceptibility Index (SI): comparative study for evaluation of pollution potential in the Nabeul-Hammamet shallow aquifer, Tunisia. *Hydrogeology Journal*. 2013 May 1; 21(3):715-31.
- [16]. Nohegar, A., Riahi, F. The Comparison of Fuzzy Drastic Model and Conventional Drastic Model to Determine the Most Appropriate Indicator of Groundwater Vulnerability, Case Study: Sarkhoon Plain Aquifer. *Journal of Environmental Studies*, 2014; 40(3):711-722. (In Persian)
- [17]. Nakhaei M, Amiri V, Rahimi shahr Babaki M. Evaluating of the potential pollution and sensitivity analysis of groundwater in the aquifer Khatoonabad using DRASTIC model based on GIS. *Advanced Applied Geology Journal*. 2013; 3(8): 1-10. (In Persian)
- [18]. Matzeu A, Secci R, Uras G. Methodological approach to assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area. *Agricultural water management*. 2017 Apr 1; 184:46-58.
- [19]. Choubin B, Malekian A. Combined gamma and M-test-based ANN and ARIMA models for groundwater fluctuation forecasting in semiarid regions. *Environmental Earth Sciences*. 2017 Aug 1; 76(15):538.
- [20]. Ghorbani Nejad S, Falah F, Daneshfar M, Haghizadeh A, Rahmati O. Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models. *Geocarto international*. 2017 Feb 1; 32(2):167-87.
- [21]. Luoma S, Okkonen J, Korkka-Niemi K. Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. *Hydrogeology Journal*. 2017 Feb 1; 25(1):203-22.

- [22]. Barzegar R, Moghaddam AA, Deo R, Fijani E, Tziritis E. Mapping Groundwater Contamination Risk of Multiple Aquifers Using Multi-Model Ensemble of Machine Learning Algorithms. *Science of The Total Environment*. 2018 Apr 15; 621:697-712.
- [23]. Regional Water Company of Hormozgan. Reclamation and balancing plan for groundwater resources of Sarkhoon plain. 2018 Jan 2.
- [24]. Rahman A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied geography*. 2008 Jan 1; 28(1):32-53.
- [25]. Neshat A, Pradhan B, Pirasteh S, Shafri HZ. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental earth sciences*. 2014 Apr 1; 71(7):3119-31.
- [26]. Aller L, Lehr JH, Petty R. DRASTIC: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National water well Association Worthington, Ohio 43085. Truman Bennett. Bennett and Williams. Inc. Columbus, Ohio. 1987; 43229.
- [27]. Regional Water Company of Hormozgan, Updating water resources balance sheet for study areas of Bandar Abbas - Sedij river basin. Sangab Zagros Consulting Engineers. 2016 Feb 4.
- [28]. Wilcox LV. Classification and use of irrigation waters. 1955
- [29]. Wilcox, L. V. The quality of water for irrigation use United States Department of Agriculture, Economic Research Service. 1948; Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture.
- [30]. Arabameri A, Rezaei K, Cerda A, Lombardo L, Rodrigo-Comino J. GIS-based groundwater potential mapping in Shahrud plain, Iran. A comparison among statistical (bivariate and multivariate), data mining and MCDM approaches. *Science of The Total Environment*. 2019 Mar 25; 658:160-77.
- [31]. Sajedi-Hosseini F, Malekian A, Choubin B, Rahmati O, Cipullo S, Coulon F, Pradhan B. A novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate groundwater contamination. *Science of The Total Environment*. 2018 Dec 10; 644:954-62.
- [32]. Constantin M, Bednarik M, Jurchescu MC, Vlaicu M. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*. 2011 May 1; 63(2):397-406.
- [33]. Jothibas A, Anbazhagan S. Modeling groundwater probability index in Ponnaiyar River basin of South India using analytic hierarchy process. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016 Sep 1; 2(3):109.
- [34]. Ercanoglu M, Gokceoglu C. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental geology*. 2002 Feb 1; 41(6):720-30.
- [35]. Al-Abadi AM, Al-Temmeme AA, Al-Ghanimy MA. 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*. 2016 Sep 1; 2(3):265-83.
- [36]. Naghibi SA, Pourghasemi HR, Pourtaghi ZS, Rezaei A. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics*. 2015 Mar 1; 8(1):171-86.
- [37]. Patriche CV, Căpățână V, Stoica DL. Aspects Regarding soil erosion spatial modeling using the USLE/RUSLE within GIS, *Geographia Tehnica*, Nr. 2.
- [38]. Moore ID, Grayson RB, Ladson AR. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*. 1991 Jan;5(1):3-0.
- [39]. Chen T, Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining 2016 Aug 13 (pp. 785-794)*. ACM.
- [40]. Fan J, Wang X, Wu L, Zhou H, Zhang F, Yu X, Lu X, Xiang Y. Comparison of Support Vector Machine and Extreme Gradient Boosting for predicting daily global solar radiation using temperature and precipitation in humid subtropical climates: A case study in China. *Energy conversion and management*. 2018 May 15; 164:102-11.
- [41]. Nicodemus KK. Letter to the Editor: On the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures. *Briefings in bioinformatics*. 2011 Apr 15; 12(4):369-73.
- [42]. Feng D, Svetnik V, Liaw A, Pratola M, Sheridan RP. Building Quantitative Structure-Activity Relationship Models Using Bayesian Additive Regression Trees. *Journal of chemical information and modeling*. 2019 May 6.

- [43]. Voudouris K, Kazakis N, Polemio M, Kareklas K. Assessment of intrinsic vulnerability using DRASTIC model and GIS in Kiti aquifer, Cyprus. *European water*. 2010.
- [44]. Dewan A. *Floods in a megacity: geospatial techniques in assessing hazards, risk and vulnerability*. Dordrecht: Springer; 2013 Mar 1.
- [45]. Mousavi SM, Golkarian A, Naghibi SA, Kalantar B, Pradhan B. GIS-based groundwater spring potential mapping using data mining boosted regression tree and probabilistic frequency ratio models in Iran. *AIMS Geosci*. 2017 Mar 2;3(1):91-115.