

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل DRATIC و SI در محیط GIS (مطالعه موردی: دشت عجب‌شیر)

مهسا نخستین روحی^۱، محمدحسین رضایی مقدم^{۲*}، توحید رحیم‌پور^۳

۱ و ۳. کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز

۲. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۲/۲۵)

چکیده

دشت عجب‌شیر در استان آذربایجان شرقی و در شمال غرب ایران واقع شده است. این دشت تأمین‌کننده آب شرب، کشاورزی و صنعت شهرستان عجب‌شیر است. در این تحقیق با توجه به ویژگی‌های هیدرولوژی و هیدروژئولوژی منطقه مطالعه‌شده، آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی آبخوان در برابر عوامل آلاینده با استفاده از دو مدل DRATIC و SI در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی پهنه‌بندی شده است. در مدل DRATIC از هفت پارامتر شامل عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری استفاده می‌شود. در مدل SI نیز پنج عامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، سنگ‌شناسی آبخوان، توپوگرافی و کاربری اراضی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان مؤثرند. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS و وزن‌دهی آنها، با تلفیق لایه‌های هر یک از دو مدل، نقشه نهایی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به آلودگی تهیه شد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی به‌دست‌آمده از مدل SI، حدود ۲/۲۴ درصد از منطقه مطالعه‌شده در محدوده آسیب‌پذیری خیلی کم، ۵/۲۷ درصد آسیب‌پذیری کم، ۴۵/۰۸ درصد آسیب‌پذیری متوسط تا کم، ۳۹/۰۹ درصد آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد و ۸/۳ درصد در محدوده آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. بر اساس نقشه مدل DRATIC نیز ۱۳/۴۸ درصد از مساحت منطقه مطالعه‌شده در محدوده آسیب‌پذیری خیلی کم، ۵۵/۴۳ درصد آسیب‌پذیری کم، ۲۸/۶۹ درصد آسیب‌پذیری متوسط تا کم و ۳/۰۸ درصد در محدوده آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار دارد. ارزیابی دو مدل استفاده‌شده با شاخص کیفی TDS نشان داد مدل SI با ضریب همبستگی ۰/۷۶ نسبت به مدل DRATIC دقت زیادی برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری منطقه دارد. همچنین با توجه به نقشه‌های تهیه‌شده از هر دو مدل و به‌منظور کنترل و جلوگیری از آلودگی بیشتر آبخوان دشت عجب‌شیر و نگهداری این منابع با ارزش برای استفاده آیندگان، حفاظت از منابع آب زیرزمینی منطقه مطالعه‌شده توسط مدیران و برنامه‌ریزان ضروری است.

کلیدواژگان: آب‌های زیرزمینی، آسیب‌پذیری، سیستم اطلاعات جغرافیایی، دشت عجب‌شیر، مدل SI، مدل DRATIC.

مقدمه

در جهان امروز، مسئله تأمین آب شیرین جزء بزرگ‌ترین دغدغه‌های بشر است. این مشکل در کشورهای گرم و خشک به شکل پررنگ‌تری مشاهده می‌شود. متأسفانه، کشور ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد و این امر، اهمیت توجه به آب‌های زیرزمینی را دوچندان می‌کند. مهم‌ترین مشکل امروزی آب‌های زیرزمینی آلودگی است. از جمله نتایج زیان‌بار آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌توان به کاهش کیفیت آب شرب، بالارفتن هزینه تصفیه و ایجاد مشکلات بهداشتی و زیست‌محیطی اعم از شیوع انواع بیماری‌ها در انسان و دام و آبیان اشاره کرد.

منابع آب زیرزمینی به شکل‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارند که تشخیص و کنترل آلودگی در آنها نسبت به آب‌های سطحی مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. به دلیل استمرار آلودگی در این منابع، بهترین روش جلوگیری از آلودگی آنها شناسایی منابع آلوده‌کننده و مناطق آسیب‌پذیر، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و به‌کارگیری سیاست‌های مدیریتی مناسب است [۱]. تهیه نقشه نقاط مستعد آلودگی می‌تواند به‌عنوان کمک‌کننده‌ای برای دستگاه‌های تصمیم‌گیرنده به‌منظور حفاظت منابع آب زیرزمینی باشد [۲]. امکان نفوذ و انتشار آلاینده‌ها به درون سیستم آب زیرزمینی، آسیب‌پذیری نامیده می‌شود. مفهوم آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی براساس این فرض بنا شده است که محیط فیزیکی ممکن است آب‌های زیرزمینی را در برابر برخی آثار نامطلوب طبیعی، به‌خصوص در مواردی که آلودگی وارد سطح زمین می‌شود، حفاظت کند [۳].

آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را می‌توان به دو گروه آسیب‌پذیری ذاتی^۱ و آسیب‌پذیری ویژه^۲ تقسیم کرد. در آسیب‌پذیری ذاتی، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به آلودگی‌های ایجادشده توسط فعالیت‌های بشری مد نظر است و در محاسبه آن از خصوصیات ذاتی زمین‌شناسی، خصوصیات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه، جدای از طبیعت آلودگی استفاده می‌شود. در آسیب‌پذیری ویژه، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به یک آلودگی خاص و یا گروهی از آلاینده‌ها ارزیابی شده و در محاسبه

آن خصوصیات آلاینده و ارتباط آن با اجزای مختلف آسیب‌پذیری ذاتی مد نظرند [۱].

روش‌های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری در یک آبخوان وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های شاخص و هم‌پوشان، روش‌های آماری و روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی اشاره کرد [۴]. اصولاً روش‌های شاخص و هم‌پوشان از ترکیب پارامترهای هیدروژئولوژیک مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌شوند. در این روش‌ها برای تعیین اهمیت نسبی، هر یک از پارامترها نسبت به سایرین ارزیابی می‌شوند. اگرچه این روش‌ها فرایندهای مؤثر در آلوده‌شدن منابع آب زیرزمینی را به‌طور کامل شرح نمی‌دهند، به‌دلیل ساده‌بودن روش و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز، اهمیت ویژه‌ای دارند [۵]. روش‌های آماری به‌دلیل تکیه این روش‌ها به تعداد زیادی داده از نواحی آلوده‌شده توسعه کمی پیدا کرده‌اند. روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی از شیمی و فیزیک واقعی انتقال آلوده‌کننده به زیرزمین برای پیش‌بینی میزان میرایی، جذب یا کسب انرژی دوباره به‌وسیله آلوده‌کننده به‌هنگام انتقال به زیرزمین، الهام می‌گیرند. مدل‌های کامپیوتری می‌توانند به‌منظور محاسبه زمان پیمایش و نیز مقدار آلاینده به کار برده شوند. این محاسبات بر مبنای دانش آماری یا کارشناسی نیستند، بلکه بر اساس اصول علمی بنیادینی هستند که حرکت آب و آلوده‌کننده‌ها را کنترل می‌کنند.

تا کنون مطالعات مختلفی با استفاده از هر یک از روش‌های یادشده برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است که به چند مورد آن اشاره می‌شود. معروفی و همکارانش [۶] برای شناسایی نواحی آسیب‌پذیر آبخوان دشت ملایر در برابر آلودگی از روش‌های DRASTIC، DRASTIC کشاورزی و SI^۳ استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل DRASTIC کشاورزی بهترین مدل برای این منطقه است. براساس نقشه این روش ۱۵/۵، ۷۱/۶۶ و ۱۲/۸۴ درصد از وسعت دشت به‌ترتیب در محدوده‌های آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد. احمدی و همکارانش [۷] آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلفچگان-نی‌زار در برابر آلودگی کشاورزی را به کمک مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی ارزیابی کردند. در این روش هفت عامل

1. Intrinsic Vulnerability
2. Specific Vulnerability

3. Susceptibility Index

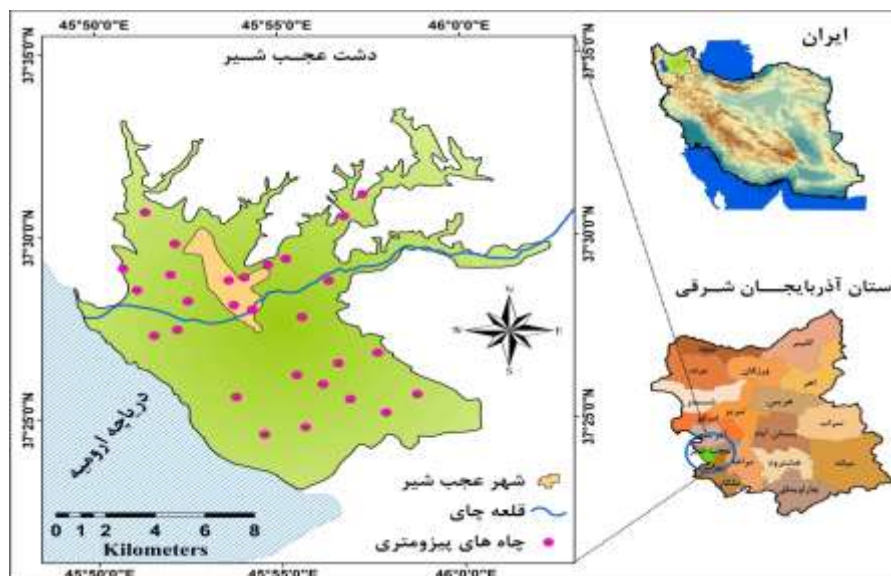
وجود آسیب‌پذیری کم تا متوسط نسبت به آلاینده‌های شیمیایی و آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد نسبت به نفوذ املاح موجود در آب دریا بود.

دشت عجب‌شیر از دشت‌های مهم و حاصل‌خیز استان آذربایجان شرقی است و بیشتر اراضی این دشت کاربری کشاورزی دارند و استفاده از سموم و کودهای شیمیایی در کشاورزی منطقه اجتناب‌ناپذیر است. همچنین فرارگیری شهر عجب‌شیر و روستاهای زیاد در این دشت و وجود فاضلاب‌های شهری و روستایی، منابع آب زیرزمینی این دشت را در معرض آلودگی قرار داده است. بنابراین، با تهیه نقشه آسیب‌پذیری می‌توان منابع آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر را با مدیریت صحیح از خطر آلودگی محافظت کرد. بر این اساس، در پژوهش حاضر به‌منظور شناسایی نواحی آسیب‌پذیر آبخوان دشت عجب‌شیر در برابر آلودگی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری دشت از دو روش DRASTIC و SI و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است.

منطقه مطالعه شده

دشت عجب‌شیر با مساحت ۱۴۴/۶۹ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی و در شهرستان عجب‌شیر واقع شده است. این منطقه از لحاظ موقعیت جغرافیایی در طول جغرافیایی ۴۵ درجه، ۴۹ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۴۶ درجه، ۲ دقیقه و ۲۵ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه، ۲۳ دقیقه و ۴ ثانیه تا ۳۷ درجه، ۳۳ دقیقه و ۲۹ ثانیه شمالی قرار گرفته است. کمترین و بیشترین ارتفاع این دشت به ترتیب ۱۲۸۰ و ۱۶۴۱ متر از سطح دریاست. متوسط بارندگی سالانه به حدود ۳۲۹ میلی‌متر در سال می‌رسد. این دشت از جمله مناطق مهم کشاورزی استان آذربایجان شرقی و کشور است که با بحران آب‌های زیرزمینی روبه‌روست [۱۳]. برای تعیین محدوده آبخوان دشت عجب‌شیر از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگرفته از سازمان زمین‌شناسی کشور (برگ‌های عجب‌شیر، آذرشهر و مراغه برای پوشش کامل منطقه) استفاده شده و محدوده دشت عجب‌شیر در محیط نرم‌افزار ArcGIS رقمی شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده را در ایران و استان آذربایجان شرقی نشان می‌دهد.

هیدروژئولوژیک مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی ترکیب شدند. نتایج مربوط به حریم‌های مختلف کیفی نشان داد حریم کیفی محدوده مطالعاتی در چهار رده حریم‌های خیلی کم، کم، متوسط و زیاد قرار دارد که به ترتیب قبل از تصحیح مدل ۵۵۰، ۸۵۳، ۱۵۰ و ۴۹۸ کیلومتر مربع و بعد از تصحیح مدل مقادیر یادشده به ترتیب به ۳۵۱، ۴۸۶، ۴۰۱ و ۴۲۵ کیلومتر مربع تغییر یافت. تبرما به و واعظی هیر [۸] برای پتانسیل‌یابی آلودگی منابع آب زیرزمینی در دشت تبریز از مدل دراستیک استفاده کردند و نقشه آسیب‌پذیری آبخوان در برابر آلودگی را تهیه کردند. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری برگرفته از نتایج نشان داد ۵۵/۸۴ درصد از منطقه اندیس دراستیک بین ۱۲۰-۱۴۰ داشته است و به ترتیب ۲۲/۰۸، ۲۱/۸۱ و ۰/۲۶ درصد در محدوده متوسط تا زیاد، کم و زیاد قرار دارند. نخعی و همکارانش [۹] با استفاده از مدل دراستیک، پتانسیل آلودگی و آنالیز حساسیت آب زیرزمینی آبخوان خاتون‌آباد را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد حدود ۳۰ درصد از منطقه مطالعه‌شده در محدوده آسیب‌پذیری کم و ۷۰ درصد باقی‌مانده در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد. محدوده آسیب‌پذیری متوسط قسمت‌های وسیعی از شمال غرب، غرب و مرکز آبخوان را در بر می‌گیرد. اتینه آکه و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش‌های دراستیک و SI آسیب‌پذیری نسبت به آلودگی نترات در وب بونوا (جنوب شرق ساحل عاج) را بررسی کردند. سه کلاس آسیب‌پذیری خیلی کم، زیاد و خیلی زیاد توسط روش SI و سه کلاس آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد توسط روش دراستیک شناسایی شدند. بررسی‌ها نشان داد طبقه زیاد با ۶۶/۱۸ درصد (در روش دراستیک) و طبقه خیلی زیاد با ۵۲ درصد (در روش SI) کلاس‌های بیشترین مساحت را دارند. ساها و آلم [۱۱] با استفاده از مدل دراستیک، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی دشت گانگتیک واقع در هندوستان را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بخش‌های جنوب غرب و مرکز منطقه در بالاترین رده از لحاظ آسیب‌پذیری قرار دارند. پدریرا و همکارانش [۱۲] آسیب‌پذیری آب زیرزمینی را در یک آبخوان ساحلی در شرق رودخانه نستوس واقع در کشور یونان بررسی کردند. در این تحقیق از دو شاخص DRASTIC و GALDIT و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. نتایج بررسی‌ها بیان‌کننده



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده

روش تحقیق

در این تحقیق برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت عجب‌شیر از نظر آلودگی از دو روش DRASTIC و SI استفاده شده است. روش دراستیک که نخستین بار توسط آلر و همکارانش در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آب‌های زیرزمینی است. پارامترهای استفاده‌شده در این روش شامل عمق سطح ایستابی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، اثر محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی آبخوان (C) است [۱۴]. پس از استخراج نقشه‌های هفت پارامتر مورد نیاز، نقشه آسیب‌پذیری به روش دراستیک با استفاده از هم‌پوشانی شاخص‌ها به‌دست می‌آید. برای تهیه نقشه شاخص دراستیک از معادله ۱ استفاده می‌شود:

$$DI = \sum_{j=1}^7 r_j w_j = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + \quad (1)$$

$S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$
در رابطه ۱ DI شاخص دراستیک، حروف بزرگ؛ حروف اول نام لایه‌ها، اندیس r؛ رتبه لایه و اندیس w؛ وزن لایه را نشان می‌دهد. محدوده عددی شاخص دراستیک می‌تواند بین ۲۳ تا ۲۳۰ متغیر باشد که در هشت کلاس با درجات کیفی از بسیار کم تا بسیار زیاد تقسیم‌بندی می‌شود [۱۵].

روش SI (شاخص حساسیت) روشی برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری ویژه آبخوان است. در این روش پنج

پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، سنگ‌شناسی آبخوان، توپوگرافی و کاربری اراضی (LU) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان استفاده می‌شود. تفاوت اصلی این روش با روش دراستیک، ورود پارامتر کاربری اراضی به آن است. این روش در سال ۲۰۰۰ توسط ریبریو با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در مقیاس بزرگ تا متوسط تهیه لایه‌های مدل SI و وزن‌دهی هر یک از طبقات لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS، شاخص حساسیت از مجموع وزنی پارامترهای یادشده به‌دست می‌آید (رابطه ۲):

$$SI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + \quad (2)$$

$$T_r T_w + LU_r LU_w$$

در این رابطه SI؛ شاخص حساسیت، حروف بزرگ؛ حرف اول نام لایه‌ها، اندیس r؛ رتبه لایه و اندیس w؛ وزن لایه است. مقدار عددی شاخص حساسیت می‌تواند بین صفر تا ۱۰۰ متغیر باشد [۱۶]. در شکل ۲ ساختار مدل DRASTIC و SI برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت عجب‌شیر آورده شده است.

در جدول ۱ وزن هر یک از طبقات لایه‌های استفاده‌شده در روش DRASTIC ارائه شده است. نقشه چهار پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط اشباع و توپوگرافی در روش SI همانند روش دراستیک رتبه‌بندی می‌شوند و تنها تفاوت آنها در این است که در روش SI، رتبه‌های زیرمعیاری این لایه‌ها باید در عدد

در خاک پخش، رقیق یا جذب می‌شوند و احتمال پالایش آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش عمق، پتانسیل آلودگی کاهش خواهد یافت.

تغذیه خالص (R)

تغذیه مقدار آبی است که در سطح زمین نفوذ می‌کند و به سطح ایستایی می‌رسد [۱۸]. این عامل سبب حرکت عمودی آلاینده‌ها به صورت محلول یا کلوئیدی یا معلق به درون زمین می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه تغذیه خالص وجود دارد. در تحقیق حاضر از روش پیسکوپو برای تهیه لایه تغذیه خالص استفاده شد. این روش سه عامل بارندگی، شیب (درصد) و نفوذپذیری خاک را مد نظر قرار می‌دهد. برای تهیه نقشه بارندگی از آمار متوسط بارندگی سالانه ایستگاه‌های موجود در منطقه و روش درون‌یابی IDW به دلیل دقت بیشتر استفاده شد. نقشه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تهیه شد و نقشه نفوذپذیری خاک نیز از طریق درون‌یابی آمار نفوذپذیری نقاط معلوم به روش IDW حاصل شد. رتبه‌بندی نقشه‌های شیب، نفوذپذیری، بارش و تغذیه خالص در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق این جدول رتبه ۱ به نقشه بارندگی اطلاق شد، چرا که متوسط بارندگی منطقه ۲۵۹ میلی‌متر در سال است. در نهایت، بر اساس معادله پیسکوپو نقشه‌های رتبه‌بندی شیب و نفوذپذیری و رتبه بارش یعنی ۱ در محیط نرم‌افزار ArcGIS جمع شده و نقشه تغذیه حاصل شد.

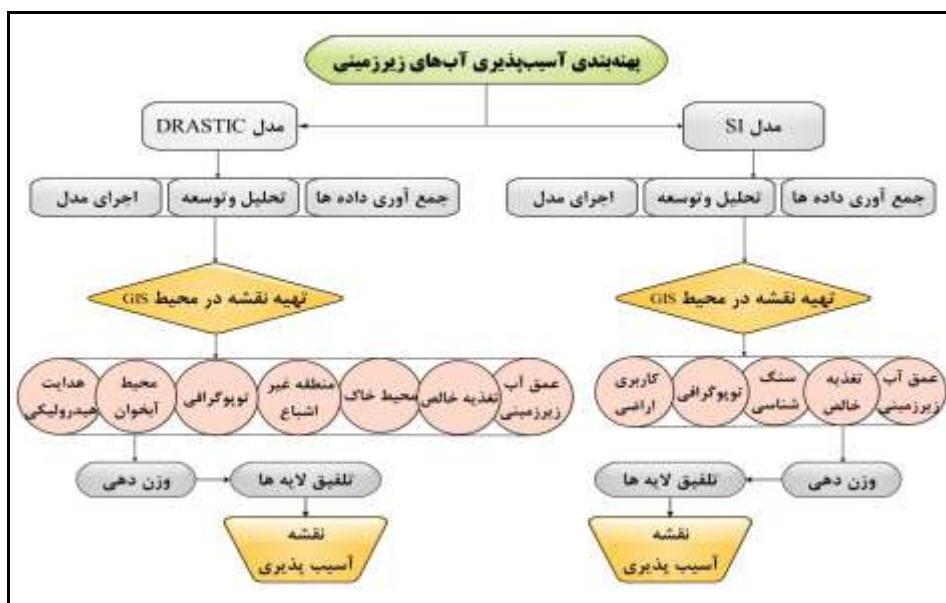
۱۰ ضرب شود. یعنی اگر رتبه یکی از زیربخش‌های لایه‌ای در روش دراستیک ۲ باشد در روش SI به ۲۰ تبدیل می‌شود. در واقع رتبه زیر بخش‌های لایه‌های روش SI بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است.

نتایج و بحث

به منظور اهداف پژوهش، برای تهیه هر یک از لایه‌های استفاده‌شده در دو مدل DRASTIC و SI از توانایی‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و فناوری سنجش از دور استفاده شده و هر یک از لایه‌ها در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI تهیه شده است. در ادامه به بررسی هر یک از لایه‌ها و چگونگی تهیه آنها اشاره شده است.

عمق آب زیرزمینی (D)

به فاصله بین سطح زمین تا سطح ایستایی آب عمق آب زیرزمینی گفته می‌شود. به بیان دیگر، این پارامتر بیان‌کننده عمقی است که آلوده‌کننده باید طی کند تا به سطح ایستایی برسد [۱۷]. در این تحقیق برای تهیه لایه عمق از آمار سطح آب استفاده شد که از میانگین سطح آب اندازه‌گیری شده طی چهار ماه از سال ۱۳۹۰ و در ۲۶ چاه پیزومتری به دست آمده بود. لایه مد نظر با استفاده از روش درون‌یابی Kriging به دلیل دقت بیشتر نسبت به سایر روش‌ها در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. هر چه عمق آب زیرزمینی بیشتر باشد، مدت زمانی که طول می‌کشد تا آلاینده به سفره برسد افزایش می‌یابد و مواد آلاینده نیز



شکل ۲. ساختار مدل DRASTIC و SI برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت عجب‌شیر

جدول ۱. رتبه و وزن پارامترهای مدل دراستیک [۱۷]

عمق آب زیرزمینی (متر)							
محدوده	۱/۵-۰	۴/۶-۱/۵	۴/۶-۹/۱	۱۵/۲-۹/۱	۲۲/۸-۱۵/۲	۳۰/۴-۲۲/۸	>۳۰/۴
رتبه	۱۰	۹	۷	۵	۳	۲	۱
توپوگرافی (درصد)							
محدوده	۲-۰	۶-۲	۱۲-۶	۱۸-۱۲	>۱۸		
رتبه	۱۰	۹	۵	۳	۱		
هدایت هیدرولیکی (متر در روز)							
محدوده	۴/۱-۰/۰۴	۱۲/۳-۴/۱	۲۸/۷-۱۲/۳	۴۱-۲۸/۷	۸۲-۴۱	> ۸۲	
رتبه	۱	۲	۴	۶	۸	۱۰	
محیط آبخوان							
نوع سازند	شیل توده‌ای	دگرگونی	هوازده	دگرگونی	آبرفت	آهک	ماسه‌سنگ، آهک
رتبه	۲	۳	۴	۵	۶	۶	۱۰
							سنگ آهک
							کارسیتی
							بازالت
							توده شن و ماسه
							توده ماسه‌سنگ
							شیل و سنگ آهک
							ماسه‌سنگ
محیط خاک							
جنس لایه خاک	نازک یا نبود	گراول	ماسه	پیت	رس ترک خورده	ماسه لومی	لوم
رتبه	۱۰	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵
							سپت لومی
							رس لومی
							ماک
							ترک خورده رس
منطقه غیر اشباع							
نوع سازند	محصور کننده لایه	سپت و رس	شیل	سنگ آهک	ماسه‌سنگ	ماسه‌سنگ، شیل	رس و ماسه و رس
رتبه	۱	۲	۳	۴	۶	۶	۶
							دگرگونی
							شن و ماسه
							بازالت
							کارسیتی
							سنگ آهک

جدول ۲. رتبه‌بندی تغذیه خالص و عوامل مؤثر بر آن [۱۹]

میزان تغذیه	شیب (درصد)		بارندگی (میلی‌متر)		نفوذپذیری خاک	
	محدوده	فاکتور	محدوده	فاکتور	محدوده	فاکتور
رتبه	محدوده	فاکتور	محدوده	فاکتور	محدوده	فاکتور
۱۰	۵-۳	۱	>۵۰۰	۱	خیلی کم	۱
۳۰	۷-۵	۲	۷۰۰-۵۰۰	۲	کم	۲
۵۰	۹-۷	۳	۸۵۰-۷۰۰	۳	متوسط	۳
۸۰	۱۱-۹	۴	بیشتر از ۸۵۰	۴	متوسط تا زیاد	۴
۱۰۰	۱۴-۱۱	۵	-	۵	زیاد	۵

سنگ‌شناسی آبخوان (محیط آبخوان) (A)

این عامل به خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده منطقه اشباع مانند میزان تخلخل، جنس، اندازه و جورشدگی ذرات مربوط است که میزان پویایی و تحرک آلودگی و به‌بیانی فرایندهای رقیق‌سازی آلودگی مانند تجزیه شیمیایی، جذب، پخش و تأخیر را کنترل می‌کند [۱۷]. برای تهیه نقشه این فاکتور از

اطلاعات مربوط به جنس طبقه اشباع در ۲۷ مقطع حفاری و لوله‌گذاری و کاوش‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی در منطقه مطالعه شده استفاده شد. هر چه ذرات مواد تشکیل‌دهنده محیط آبخوان دانه‌درشت باشد، میزان نفوذپذیری در این ناحیه بیشتر خواهد بود و هیچ واکنشی بین آلاینده و خاک صورت نخواهد گرفت و در نتیجه سرعت زیاد انتشار

منطقه غیراشباع (I)

این لایه نشان‌دهنده جنس خاک از منطقه زیرین محیط خاک تا سطح ایستایی، یعنی ناحیه غیراشباع یا وادوز است. خلل و فرج این ناحیه به لحاظ آبداربودن، غیراشباع یا نیمه‌اشباع است. برای تهیه نقشه این پارامتر از داده‌های مربوط به جنس خاک منطقه غیراشباع در ۲۷ مقطع حفاری و لوله‌گذاری در دشت عجب‌شیر استفاده شد. همچنین کاوش‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی برای تعیین جنس خاک در مقاطع غیراشباع استفاده شد. هر چه منطقه غیراشباع نفوذپذیری بیشتری داشته باشد، واکنش کمتری بین آلاینده‌ها و ذرات خاک شکل می‌گیرد و شست‌وشو به سمت آبخوان سریع‌تر و بیشتر می‌شود. در نتیجه پتانسیل آلودگی افزایش می‌یابد.

هدایت هیدرولیکی (C)

هدایت هیدرولیکی عبارت است از توانایی محیط آبخوان برای انتقال آب و مواد آلاینده همراه آن. این پارامتر انتقال و پراکندگی آلاینده را از نقطه تزریق در داخل منطقه اشباع کنترل می‌کند [۱۸]. این فاکتور به تداخل بین‌دانه‌ای و درز و شکاف‌های موجود در منطقه اشباع و همچنین به شیب هیدرولیکی زمین بستگی دارد. برای تهیه نقشه هدایت هیدرولیکی، نقشه قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت لایه اشباع تقسیم می‌شود. ضریب انتقال یا قابلیت انتقال یک لایه آبدار عبارت است از مقدار آبی که از یک واحد سطح مقطع لایه آبدار تحت شیب هیدرولیکی واحد عبور می‌کند و واحد آن مترمربع در روز (متر در روز در هر متر ضخامت لایه) است. در مفهوم ضریب انتقال فرض می‌شود که حرکت آب در آبخوان به صورت افقی است [۲۲]. در این تحقیق نقشه قابلیت انتقال از آمار به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌های پمپاژ و با استفاده از روش درون‌یابی Kriging (به دلیل دقت بیشتر نسبت به سایر روش‌ها) به دست آمد. نقشه ضخامت لایه اشباع نیز از درون‌یابی داده‌های مربوط به عمق ناحیه اشباع حاصل از مقاطع حفاری به روش Kriging (به دلیل دقت بیشتر) حاصل شد.

کاربری اراضی (LU)

برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI، گذر ۱۶۸ و ردیف ۳۴، مربوط به ۲۶ ماه می ۲۰۱۴ (۵ خرداد ۱۳۹۳) و با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر

آلاینده‌ها، پتانسیل آلودگی افزایش می‌یابد [۹]. وجود ذرات ریزدانه در این بخش، مدت زمان عبور آلاینده از این منطقه را افزایش می‌دهد که سبب افزایش فرایندهایی نظیر جذب، پخش و واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌ها می‌شود و در نتیجه پتانسیل آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد [۱۴]. نقشه سنگ‌شناسی آبخوان شامل چهار بخش آبرفت ریزدانه، دگرگونی، شن و ماسه و شیل و آهک است. طبقه دگرگونی به دلیل یکپارچگی و نفوذپذیری خیلی کم کمترین امتیاز را دریافت کرده است. نفوذپذیری به ترتیب در آبرفت ریزدانه، شیل و آهک و شن و ماسه افزایش می‌یابد و در نتیجه رتبه‌های این طبقات نیز افزایش یافته است.

محیط خاک (S)

این فاکتور که برای تعیین توزیع مکانی انواع خاک در منطقه استفاده می‌شود، نشان‌دهنده بافت خاک از سطح زمین تا قسمت بالایی منطقه غیراشباع (وادوز) است. لایه خاک معمولاً با ضخامتی حدود ۰/۵ تا ۲ متر به دلیل فعالیت نسبتاً زیاد میکروبی، وجود مواد آلی زیاد و وجود ریشه گیاهان، برای حذف و کاهش غلظت آلاینده‌ها پتانسیل زیادی دارد [۲۰]. پتانسیل آلودگی آبخوان به خصوصیات خاک مانند نفوذپذیری، بافت و درصد مواد آلی خاک بستگی دارد [۲۱]. در این تحقیق برای تهیه نقشه خاک از نقشه خاک استخراج‌شده با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ توسط اداره جهاد کشاورزی استفاده شد. برای تهیه نقشه رستری، نقشه اسکن‌شده اولیه زمین مرجع و سپس رقومی شد. در محیط خاک هر چه مقدار رس و ماده آلی کمتر باشد، ظرفیت میرایی کاهش و نفوذپذیری و پویایی آلاینده افزایش می‌یابد.

توپوگرافی (T)

عامل توپوگرافی، بیان‌کننده تغییرات شیب منطقه است. متوسط درصد شیب بین دو نقطه از تقسیم فاصله عمودی بر فاصله افقی بین آنها و ضرب این مقدار در عدد ۱۰۰ حاصل می‌شود [۱۵]. در این تحقیق نقشه شیب با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. تغییرات شیب، میزان نفوذ بارندگی در زمین و شدت رواناب را کنترل می‌کند، به طوری که هر چه شیب کمتر باشد رواناب و فرسایش کمتری ایجاد می‌شود و نفوذ بارندگی در زمین با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد و در نتیجه پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود.

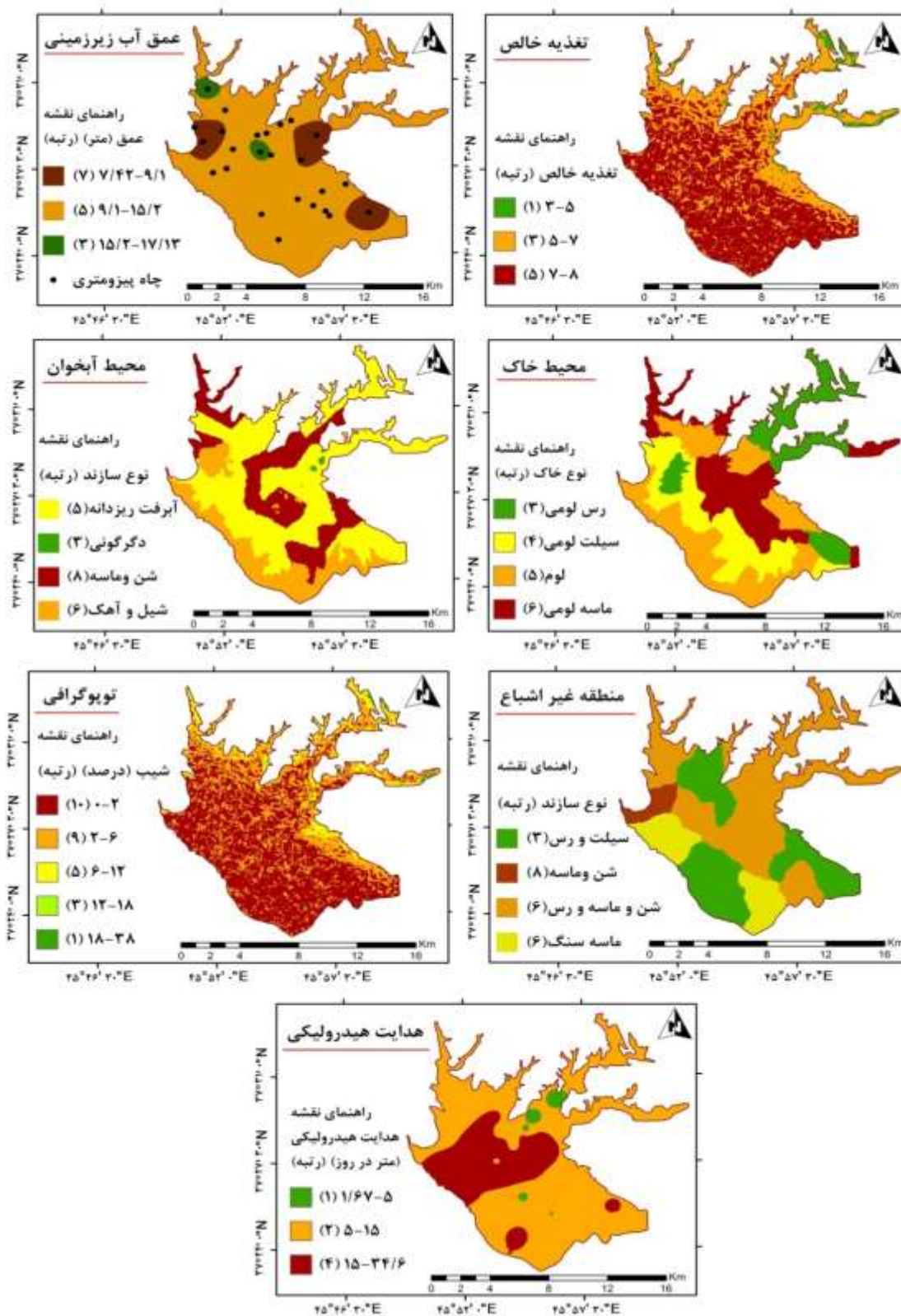
استفاده شد. منطقه مطالعه شده شامل کاربری‌های باغ، تأسیسات، جاده، رودخانه، شوره‌زار، مرتع، مسکونی و کشاورزی آبی است. بیشترین رتبه به کاربری کشاورزی داده شده است، چرا که کودهای شیمیایی استفاده شده در مزارع توسط آب آبیاری و بارندگی شسته شده و به راحتی در سطح زمین نفوذ می‌کنند. شیب کم در این نواحی نیز نفوذ آلاینده‌ها را آسان می‌کند. مناطق مسکونی، تأسیسات و جاده در دومین رتبه از لحاظ افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان قرار دارند. این می‌تواند به دلیل آلودگی‌های ناشی از عوامل انسانی باشد. پس از آن باغ در جایگاه سوم قرار گرفته است. در نهایت، رودخانه به دلیل نفوذپذیری بسیار اندک رتبه صفر را از لحاظ افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان به خود اختصاص داده است. رتبه‌بندی زیرمعیارهای این پارامتر در جدول ۳ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۳ و ۴ هر یک از لایه‌های مدل DRASTIC و SI و رتبه هر یک از طبقات لایه‌ها نشان داده شده است.

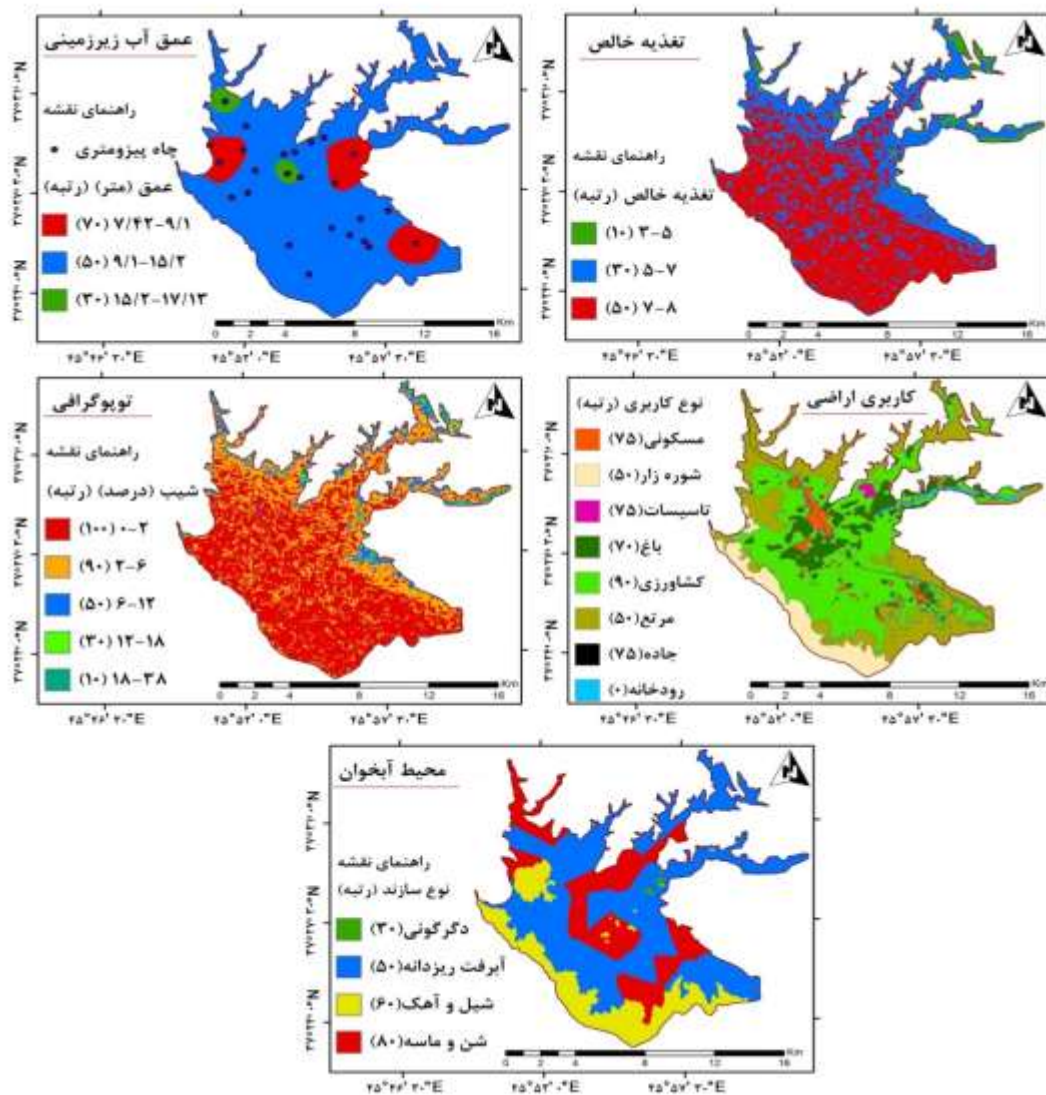
پس از تهیه هر یک از لایه‌های مدل DRASTIC و SI، برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان، لایه‌های هر مدل در محیط نرم‌افزار ArcGIS با هم تلفیق شد و نقشه نهایی به دست آمد. نقشه‌های هر یک از دو مدل بر اساس طبقه‌بندی آلر و همکارانش [۱۷] و استیگتر و همکارانش [۱۵] طبقه‌بندی شد. شاخص حساسیت برای منطقه مطالعه شده از ۳۰/۴۲ تا ۷۶/۴۱ محاسبه شده است. طبق این شاخص، آبخوان دشت عجب‌شیر پنج طبقه آسیب‌پذیری از خیلی کم تا زیاد دارد. محاسبه مساحت هر یک از طبقات نشان می‌دهد

جدول ۳. رتبه‌بندی کاربری اراضی در مدل شاخص حساسیت [۱۵]

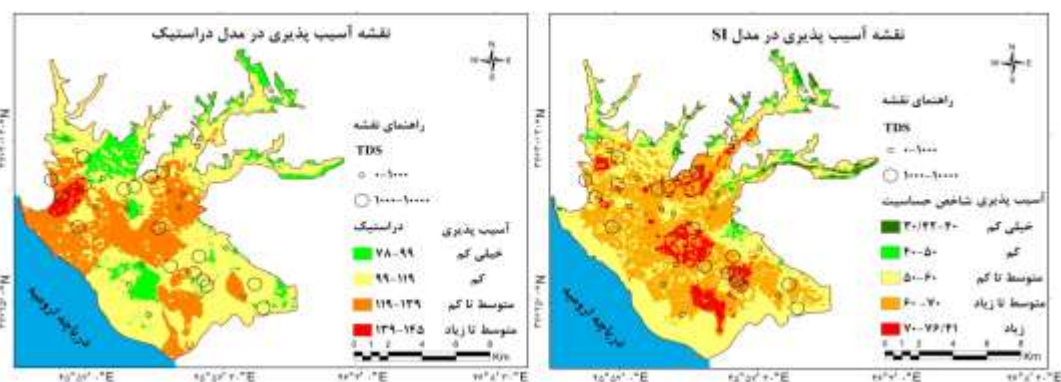
رتبه	نوع کاربری
۹۰	محیط‌های آبیاری (محصولات سالیانه)، مزارع برنج
۷۰	محصولات دائمی (باغستان، تاکستان)
۵۰	مناطق کشاورزی ناهمگن
۵۰	مراتع و نواحی جنگلی - کشاورزی
۱۰۰	ضایعات صنعتی، محل‌های دفن زباله
۸۰	معادن سنگ، کارخانه‌های کشتی‌سازی، معادن صحرایی
۷۵	مناطق شهری پیوسته، فرودگاه، بندر، جاده، راه آهن، مناطق صنعتی و تجاری خارج از فضای سبز
۷۰	مناطق شهری ناپیوسته
۵۰	محیط‌های آبی (باتلاق‌های نمک، دریاچه نمک، نواحی جزر و مدی)
.	جنگل‌ها و نواحی نیمه‌طبیعی
.	مناطق آبی



شکل ۳. نقشه لایه‌های مدل DRASTIC



شکل ۴. نقشه لایه‌های مدل SI



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آسیب پذیری آبخوان دشت عجب‌شیر

جدول ۴. مساحت طبقات آسیب‌پذیری در نقشه‌های مدل SI و DRASTIC

درصد مساحت	مساحت (Km ²)	مدل DRASTIC	آسیب‌پذیری	مدل SI	مساحت (Km ²)	درصد مساحت
۱۳/۴۸	۱۹/۴۴	۹۹-۷۸	خیلی کم	۴۰-۳۰/۴۲	۳/۲۵	۲/۲۴
۵۵/۴۳	۷۹/۹۳	۱۱۹-۹۹	کم	۵۰-۴۰/۱	۷/۶۲	۵/۲۷
۲۸/۶۹	۴۱/۳۷	۱۳۹-۱۱۹	متوسط تا کم	۶۰-۵۰/۱	۶۵/۱۷	۴۵/۰۸
۳/۰۸	۴/۴۵	۱۴۵-۱۳۹	متوسط تا زیاد	۷۰-۶۰/۱	۵۶/۵۱	۳۹/۰۹
-	-	-	زیاد	۷۶/۴۱-۷۰/۱	۱۲	۸/۳

رفتند. این پارامترها عبارت‌اند از: عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، سنگ‌شناسی آبخوان، توپوگرافی و کاربری اراضی. سیستم اطلاعات جغرافیایی به دلیل توانایی بسیار زیاد در مدیریت حجم انبوهی از داده‌های مکانی، برای تحلیل پارامترهای مدل SI و تهیه نقشه آسیب‌پذیری به کار گرفته شد. پنج پارامتر مدل SI با استفاده از توابع موجود در محیط GIS تهیه و طبقه‌بندی شدند. شاخص آسیب‌پذیری که از ترکیب خطی پارامترهای مدل SI به دست می‌آید، در محیط نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شد. نقشه آسیب‌پذیری آبخوان نشان می‌دهد بخش‌هایی از مرکز و جنوب منطقه آسیب‌پذیری ویژه زیادی دارند. همچنین نتایج نشان داد کاربری کشاورزی آبی که بیشتر قسمت‌های دشت را پوشش می‌دهد به دلیل استفاده از سموم و کودهای شیمیایی در این بخش، آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد و زیاد دارد. در مدل DRASTIC از هفت پارامتر شامل عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان استفاده شده و پس از تهیه هر یک از لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS و رتبه‌بندی آنها، با تلفیق هفت لایه، نقشه آسیب‌پذیری به دست آمد. بر اساس مدل دراستیک تنها ناحیه کوچکی در غرب آبخوان که عمق تا سطح ایستابی کمی دارد، بیشترین آسیب‌پذیری (متوسط تا زیاد) را داراست. به طور کلی، می‌توان گفت که میزان آسیب‌پذیری آبخوان از شرق به غرب افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به مسیر جریان آب زیرزمینی که از شرق به غرب است و همچنین زیادبودن سطح ایستابی در این مناطق نسبت داد. ضریب همبستگی نقشه‌های آسیب‌پذیری دراستیک و SI با شاخص کیفی TDS (کل مواد جامد محلول) به ترتیب معادل ۰/۴۵ و ۰/۷۶ در سطح معناداری ۱ درصد است که نشان می‌دهد مدل SI با دقت

صحت‌سنجی نقشه‌های آسیب‌پذیری SI و DRASTIC

به‌طور کلی، غلظت مقادیر TDS (کل مواد جامد محلول) در آب‌های زیرزمینی آلوده و قابل شرب به ترتیب زیاد و نسبتاً کم است [۲۳ و ۲۴]. بنابراین، برای صحت‌سنجی نقشه‌های آسیب‌پذیری تهیه‌شده از هر دو مدل، ضریب همبستگی بین نقشه‌های آسیب‌پذیری و شاخص کیفی TDS محاسبه شد. اطلاعات مربوط به مقادیر TDS چاه‌های پی‌زومتری منطقه (تعداد ۳۲ چاه پی‌زومتری) از اداره آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی تهیه شده است. لایه TDS مطابق طبقه‌بندی تاد [۲۵]، به دو طبقه ۰-۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر تقسیم شد که نشان‌دهنده آب شیرین است و ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر که بیان‌کننده آب شور و آلوده است. در تحقیق حاضر، از روش آماری و محاسبه ضریب همبستگی اسپیرمن بین مقادیر TDS و نقشه‌های آسیب‌پذیری استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد مدل SI با ضریب همبستگی ۰/۷۶ دقت بیشتری نسبت به مدل DRASTIC با ضریب همبستگی ۰/۴۵ در سطح معناداری ۱ درصد دارد (جدول ۵).

جدول ۵. ضریب همبستگی مقادیر TDS با نقشه‌های

آسیب‌پذیری SI و DRASTIC

مدل	ضریب همبستگی
DRASTIC	۰/۴۵
SI	۰/۷۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل SI و DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت عجب‌شیر استفاده شد. پنج پارامتر هیدروژئولوژیکی برای نشان‌دادن وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مطالعه‌شده برای استفاده در مدل SI به کار

- [9]. 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)
- [10]. Etienne Ake G, Boyossoro Kouadio H, Dongo K, Dibi B, Koffi Kouame F, Biemi J. Application of DRASTIC and SI methods for the study of the vulnerability pollution by nitrates (NO_3^-) of the sheet of Bonoua (Southeam Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 2010; 4 (5): 1676-1692.
- [11]. Saha D, Alam F. Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC and Pesticide DRASTIC models in intense agriculture area of the Gangetic plains, India. *Environ Monit Assess*. 2014; 186: 8741-8763.
- [12]. Pedreira R, Kallioras A, Pliakas F, Gkioungkis I, Schuth C. Groundwater vulnerability assessment of a coastal aquifer system at River Nestos eastern Delta, Greece. *Environ Earth Sci*. 2015; 73: 6387-6415.
- [13]. Nakhostinrouhi M. The Application of Geographic Information System in the Assessment of Groundwater Contamination Potential Using DRASTIC Model and Susceptibility Analysis (Case Study: Ajabshir Plain). M.A. thesis. Faculty of Geography and Planning. University of Tabriz. 2015. 113 p. (In Persian)
- [14]. Rezaei F. Groundwater Qualitative Vulnerability Assessment Using Fuzzy Logic, Case Study: Zayanderood River Basin Aquifers. M.A. thesis. Isfahan Universirt of Technology. 2011. (In Persian)
- [15]. Stigter TY, Ribeiro L, Carvalho Dill AMM. 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; 14 (1): 79-99.
- [16]. Ribeiro L. SI: a new index of aquifer susceptibility to agricultural pollution. Internal report. Lisbon, Portugal: ER-SHA/CVRM. 2000.
- [17]. Aller L, Bennet T, Lehr JH, Petty RJ, Hackett G. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA/600/2-87/035, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma. 1987; 641 pp.

بیشتری نقشه آسیب‌پذیری منطقه را ارائه داده است. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، برای کنترل و جلوگیری از آلودگی بیشتر آبخوان دشت عجب‌شیر و حفاظت این منابع بارزش برای استفاده آیندگان، انجام اقدامات زیر پیشنهاد می‌شود: الف) کاهش استفاده از سموم و کودهای شیمیایی در مزارع کشاورزی؛ ب) دفن‌نکردن زباله‌های صنعتی، شهری و روستایی در مناطق مسطح و با شیب کم و مناطق با نفوذپذیری زیاد برای جلوگیری از روند رو به افزایش آلودگی آبخوان دشت عجب‌شیر.

منابع

- [1]. Babiker IS, Mohamed MAA, Hiyama T, Kato K. A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Hieghts, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*. 2005; 345: 127-140.
- [2]. Tilahun K, Merkel BJ. Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. *Environmental Earth Sciences*. 2010; 59: 1485-1496.
- [3]. El-Naqa A, Hammouri N, Kioso M. GIS-based evaluation of groundwater vulnerability in the Russeifa area, Jordan. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 2006; 23(3): 277-287.
- [4]. Almasri MN. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gazacoastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management*. 2008; 88: 577-593.
- [5]. Gogu RC, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*. 2000; 549-559.
- [6]. Marofi S, Soleymani S, Ghobadi MH, Rahimi GH, Marofi H. Vulnerability assessment of Malayer plain groundwater by SINTACS, DRASTIC, and SI models. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2012; 19(3): 141-166. (In Persian)
- [7]. Ahmadi J, Akhondi L, Abbasi H, Khashei-Siuaki A, Alimadadi M. Determination of aquifer vulnerability using DRASTIC model and a single parameter sensitivity analysis and acts and omissions (Case Study: Salafchegan-Neyzar Plain). *Journal of Water and Soil Conservation*. 2013; 20(3): 1-25. (In Persian)
- [8]. Tabarmayeh M, Vaezi Hir A. Investigation on vulnerability of Tabriz-plain unconfined aquifer. *Journal of Water and Soil*. 2015; 28(6): 1137-1151. (In Persian)

- [18]. Rahman A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*. 2008; 28: 32-53.
- [19]. Piscopo G. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW. Department of Land and Water Conservation, Australia.
http://www.dlwc.nsw.gov.au/care/water/groundwater/reports/pdfs/castlereag_map_notes.pdf. 2001.
- [20]. Amirahmadi A, Abbariki Z, Ebrahimi M. Evaluation of the vulnerability of Davarzan Aquifer by DRASTIC method using GIS. *Arid Regions Geographic Studies*. 2012; 2 (6): 51-66.
- [21]. Kim YJ, Hamm SY. Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. *Hydrogeology Journal*. 1999; 17(2): 227-235.
- [22]. Alizadeh A. Principles of applied Hydrology. 33rd edition. Mashhad. Imam Reza University Press; 2011. (In Persian)
- [23]. Ozler HM. Hydrochemistry and salt-water intrusion in the Van aquifer, East Turkey. *Environmental Geology*. 2002; 43: 759-775.
- [24]. Mohammadi Z, Zare M, Sharifzade B. Delineation of groundwater salinisation in a coastal aquifer, Bousheher, South of Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2012; 67(5): 1473-1484.
- [25]. Todd DK. *Groundwater Hydrology*. 2nd edition. John Wiley and Sons, New York. 1980; PP 535.