

تعیین قابلیت آسیب‌پذیری کیفی آب زیرزمینی دشت بیرجند با استفاده از مدل دراستیک^۱ و واسنجی آن به روش تحلیل سلسله‌مراتبی^۲

مهسا رحیم‌زاده کیوی- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر
سعید حمزه* - استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
حمید کاردان‌مقدم- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۲/۱۶

چکیده

یکی از روش‌های شناسایی مناطق آسیب‌پذیر از آلودگی، استفاده از شاخص‌های کیفی است. در میان شاخص‌های کیفی موجود، شاخص دراستیک برای آسیب‌پذیری آب زیرزمینی از آلودگی، کاربرد فراوانی دارد. این شاخص از ترکیب هفت مؤلفه مختلف به دست می‌آید که هر یک وزن منحصربه‌فردی دارد. تاکنون بیشتر پژوهش‌هایی که با این شاخص صورت پذیرفته، تنها به تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان منجر شده و کمتر به مبحث واسنجی و بهینه‌سازی ضرایب ورودی این الگو پرداخته است. پژوهش پیش رو، با هدف بررسی وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان دشت بیرجند و افزایش دقت الگوی دراستیک صورت پذیرفت. برای این منظور، نقشه آسیب‌پذیری دشت بررسی شده در این پژوهش، با استفاده از شاخص دراستیک به دست آمد. سپس با توجه به مقدار غلظت نیترات آزمایش شده در چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه، واسنجی الگو با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) انجام گرفت. برای این کار، مؤلفه‌های الگوی دراستیک با توجه به مقدار ناسازگاری به‌مثابه قید، با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، الگوسازی شد. نتایج این پژوهش، از افزایش دقت الگوی دراستیک اصلاح‌شده نسبت به حالت کلی و رابطه همبستگی زیاد بین وزن‌های اصلاح‌شده با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و غلظت نیترات مشاهده‌ای حکایت دارد.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری کیفی، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، دراستیک، واسنجی.

مقدمه

در مناطق خشک که مشکل کمبود منابع سطحی وجود دارد، آب‌های زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بیشتر مناطق ایران که جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است، آب زیرزمینی مهم‌ترین تأمین‌کننده آب کشاورزی، نوشیدنی و مصارف صنعتی است. در سال‌های اخیر، این منبع حیاتی به شدت تحت تأثیر برداشت بی‌رویه و افت شدید قرار گرفته است. از سوی دیگر، در بسیاری از مناطق، خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی تهدیدی جدی برای این منابع

1. DRASTIC

2. AHP

* E- mail: saeid.hamzeh@ut.ac.ir

محدود تلقی می‌شود. توسعه روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی، سهم عمده‌ای در آلودگی‌های محیط‌زیست، به‌ویژه در بخش آب دارد. آبخوان‌های محصورنشده و نفوذپذیر، قابلیت زیادی برای آلودگی و آسیب‌پذیری دارد. آب‌های زیرزمینی به‌دلیل قابلیت کمتر برای آلودگی و همچنین ظرفیت زیاد ذخیره نسبت به آب‌های سطحی، به‌مثابه منبع مهمی در منابع آب مورد توجه است. وجود منابع مهم آلاینده‌های انتشاری و نقطه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در سطح زمین و نفوذ این آلاینده‌ها به آبخوان، سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین، در مدیریت منابع آب زیرزمینی، جلوگیری از آلودگی این آب‌ها ضروری است. تغییرات مکانی و محدودیت داده‌ها، موانعی را در پایش آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌کند و پژوهش‌ها را در این زمینه پرهزینه و اغلب ناممکن می‌کند. پژوهش‌های زیادی که از اوایل دهه نود میلادی تاکنون انجام گرفته، نشان داده است که ارزیابی آسیب‌پذیری، روشی کارا و کم‌هزینه برای شناسایی نواحی مستعد به آلودگی است (NRC). مفهوم توانایی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نخستین بار در اواخر دهه شصت در فرانسه برای هشدار درباره آلودگی آب مطرح شد (وربا و زوپورویچ، ۱۹۹۴). آسیب‌پذیری، خصوصیتی نسبی، بدون بعد و اندازه‌گیری‌نشده است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد. ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، ابزار مهمی برای طرح‌های زیست‌محیطی و تصمیم‌های مدیریتی است. روش‌های زیادی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان مطرح شده که شامل روش‌های فرایندی، روش‌های آماری و روش‌های اندیس و همپوشانی است. یکی از کارآمدترین روش‌های تعیین آسیب‌پذیری آبخوان‌ها، استفاده از الگوی دراستیک است. الگوی دراستیک، روش رتبه‌دهی است که آلر (۱۹۸۷) برای امتیازبندی آسیب‌پذیری نقاط مختلف با ترکیب چندین لایه موضوعی طراحی کرد. امروزه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و آمار مکانی، اجرای این الگو در سطح وسیع، آسان‌تر شده و دقت این محاسبات نیز تا حد زیادی افزایش یافته است. یکی از بزرگ‌ترین مزایای روش‌های رتبه‌دهی، بررسی با استفاده از تعداد بیشتری لایه‌های ورودی است که تأثیر خطاها یا عوامل نامعلوم را بر خروجی نهایی محدود می‌کند (گاگو و داسارگوس، ۲۰۰۰). با توجه به اهمیت موضوع آسیب‌پذیری آبخوان و ارزیابی توانایی روش‌ها و الگوهای مختلف در این زمینه، تاکنون پژوهش‌های مختلفی در سرتاسر جهان صورت گرفته است. بوگریا و همکاران (۲۰۱۰) برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان آنگد در کشور مراکش از الگوی دراستیک در محیط نرم‌افزار GIS استفاده کردند. آنها نقشه اصلاح‌شده دراستیک را که از مجموع شاخص دراستیک و نقشه‌های کوچک شبکه پایش به‌دست آمده بود، تهیه کردند که شامل دو طبقه‌بندی متوسط و زیاد می‌شد. سپس این نقشه را با نقشه کاربری اراضی ادغام کردند تا نقشه خطرپذیری قابلیت آلودگی آب زیرزمینی ایجاد شود. آنها بیان کردند که نقشه جدید تهیه‌شده شامل سه طبقه‌بندی متوسط، زیاد و بسیار زیاد است. اخوان و همکاران (۲۰۱۰) پژوهش‌هایی برای اصلاح الگوی دراستیک برای شبیه‌سازی آلودگی نترات در دشت بهار استان همدان انجام دادند. آنها با بهره‌گیری از الگوی دراستیک، به تهیه نقشه آسیب‌پذیری در دو حالت ذاتی و خاص اقدام کردند. در حالت نخست، با استفاده از شرایط موجود و در حالت دوم، با در نظر گرفتن اعمال مدیریتی، نقشه‌ها تهیه شد. ایشان بیان کردند که با توجه به کامل نبودن این الگو برای شبیه‌سازی هر آلودگی خاص، با توجه به مقادیر نترات اندازه‌گیری‌شده هر چاه، وزن‌های الگو را می‌توان اصلاح کرد. نتایج پژوهش آنها نشان داد که الگوی دراستیک اصلاح‌شده نسبت به نقشه‌های تهیه‌شده در دو حالت پیشین، نتایج بهتری داشته است. همچنین،

آنها پیشنهاد دادند که برای بررسی آسیب‌پذیری در مناطق مختلف، باید وزن‌های الگوی دراستیک اصلاح شود. سینیر و داواراز (۲۰۱۲) با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، واسنجی الگوی دراستیک را در محدوده اسپار تا ترکیه بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها از دقت زیاد این روش در واسنجی و تأثیر این روش با توجه به محدوده‌های آلاینده آبخوان و همچنین دریاچه و اراضی کشاورزی، با بیشترین حساسیت حمایت کرد. فیجانی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، واسنجی الگوی دراستیک را انجام دادند و نتایج پژوهش آنها حاکی از همبستگی زیاد غلظت نترات با الگوی دراستیک در منطقه بود؛ آنها برای پیش‌بینی در شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم SCMAI را پیشنهاد دادند. نشات و همکاران (۲۰۱۳) آسیب‌پذیری آبخوان‌های کشاورزی کرمان را بررسی کردند؛ نتایج واسنجی کار آنها با استفاده از آزمون ناپارامتری ویلکاکسون و غلظت نترات با ضریب همبستگی ۸۲ درصد مطرح شد. تیرکی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی، واسنجی الگوی دراستیک را انجام دادند. نتایج پژوهش آنها با واسنجی وزن و رتبه‌ها الگو براساس تشکیل ماتریس همبستگی و کمترین مقدار ضریب ناسازگاری در روش تحلیل سلسله‌مراتبی که به‌دست آمد نشان داد که وجود عوامل زمین‌شناسی عامل مهمی در آسیب‌پذیری آلودگی آب‌های زیرزمینی بوده است. راکاد تانی و همکاران (۲۰۱۳) به شناسایی مناطق حساس به آلودگی در سطح وادی کیوفرینجا^۱ در کشور اردن پرداختند و حساسیت منطقه از لحاظ خطرپذیری را با استفاده از الگوی دراستیک تجزیه و تحلیل کردند. رودریگز (۲۰۱۴) در الگوسازی مقدار نترات با استفاده از الگوریتم متغیرهای تصادفی جنگلی و از روش کاهش تعداد متغیرها و الگوریتم RF به ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در مناطق جنوبی اسپانیا پرداخت که نتایج آن حاکی از رگرسیون زیاد و توانایی شبکه بازگشتی در پیش‌بینی غلظت در آبخوان بود. افروزی و همکاران (۱۳۹۲) وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان بروجن-فراذنبه را با روش دراستیک بررسی کردند و واسنجی الگو را با استفاده از غلظت نترات در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که ضریب همبستگی پیرسون از ۴۷ به ۸۰ درصد ارتقا یافته است. معروفی و همکاران (۱۳۹۱) به مقایسه سه روش آسیب‌پذیری دراستیک، SI و SINTACS در دشت ملایر اقدام کردند؛ نتایج پژوهش آنها حاکی از عملکرد بهتر الگوی دراستیک در این محدوده بود. کرمی شاه‌ملکی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از سه روش رگرسیون لجستیک، دراستیک اصلاح‌شده و دراستیک تحلیل سلسله‌مراتبی، به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان پرداختند و درنهایت، با استفاده از ضریب اسپیرمن بین مؤلفه‌های الگو و غلظت نترات، الگوی دراستیک تحلیل سلسله‌مراتبی را گزینه مناسب دانستند و آن را انتخاب کردند. احمدی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از الگوی دراستیک، آسیب‌پذیری دشت سلفچگان-نی‌زار را از راه تجزیه و تحلیل حساسیت تک‌مؤلفه‌ای و حذفی تعیین کردند؛ پس از واسنجی الگو با داده‌های نترات منطقه، ضریب همبستگی از ۱۹ درصد به ۶۴ درصد ارتقا یافت و عمق تا سطح ایستابی، حساس‌ترین عامل در الگو معرفی شد. همچنین، نتایج پژوهش آنها حاکی از عدم انطباق وزن‌های مؤثر و نظری مؤلفه‌های به‌کاررفته بود و در بعضی موارد تفاوت‌های چشمگیری داشت. محمودزاده و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان میمه اصفهان به سه روش دراستیک، GODS و AVI پرداختند که نتایج پژوهش آنها حاکی از

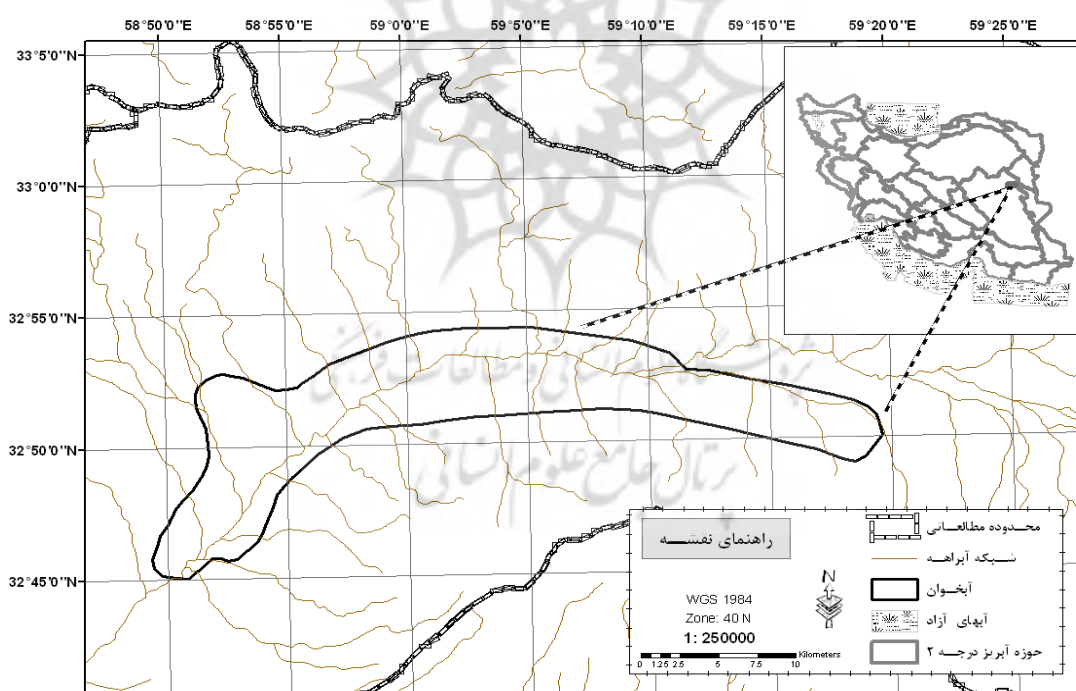
کامل بودن روش دراستیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری در سطح آبخوان‌ها بود که دلیل آن مشخصه‌های بیشتر و وزن‌دهی متفاوت مشخصه‌ها براساس تأثیر آنها بر تعیین آلودگی بود.

در این پژوهش، به‌منظور بررسی آسیب‌پذیری آبخوان بیرجند برای مدیریت زیست‌محیطی منابع آب زیرزمینی، محدوده‌های آسیب‌پذیر با استفاده از الگوی دراستیک شناسایی شد و سپس با روش تحلیل سلسله‌مراتبی، واسنجی وزن‌ها و رتبه‌های الگو براساس نتایج به‌دست‌آمده از غلظت نترات در چاه‌های مشاهده‌ای انجام پذیرفت. نتایج الگو، راهکارهای توسعه‌ای را برای مکان‌یابی طرح‌های عمرانی، با کمترین صدمه به محیط‌زیست معرفی می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

وسعت حوضه آبریز بیرجند ۳۴۵۵ کیلومتر مربع است که ۱۰۴۵ کیلومتر مربع دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد (شکل ۱).



شکل ۱. منطقه پژوهش

این محدوده براساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی، جزء مناطق خشک است. از نظر توپوگرافی، مرتفع‌ترین نقطه آن، ارتفاعات جنوبی منطقه در کوه باقران با ارتفاع ۲۷۸۷ متر است و پست‌ترین نقطه آن در خروجی دشت در روستای فدشک با ارتفاع ۱۲۴۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد است. شیب زمین در قسمت‌های شرقی زیاد است و هرچه به سمت غرب و قسمت‌های انتهایی دشت حرکت می‌کنیم، شیب آن کم می‌شود و سطح زمین به‌طور تقریبی، مسطح

می‌شود. منطقه پژوهش بین طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۸ دقیقه واقع شده است. میانگین بارش سالانه حوضه ۱۵۶/۷ میلی‌متر (میانگین سی‌ساله) و متوسط دمای سالانه ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد است. رودخانه شاهرود مهم‌ترین زهکش سطح دشت است که از ارتفاعات شرقی دشت سرچشمه گرفته، پس از طی مسیر ۱۰۸ کیلومتری و پیوستن آبراهه‌های زیادی، به‌ویژه از سمت شمال و جنوب حوضه به آن، در نهایت به کویر لوت می‌ریزد.

داده‌های استفاده‌شده

با توجه به جهت حرکت آب زیرزمینی و سفره‌های آب زیرزمینی در منطقه پژوهش، انتقال آلودگی از سفره‌های مجاور به سفره آب زیرزمینی بیرجند ممکن نیست؛ بنابراین در این پژوهش، برای برآورد مقدار آسیب‌پذیری آبخوان دشت بیرجند از آلودگی، از داده‌های مختلف هیدروژئولوژیکی آبخوان استفاده شد. این داده‌ها شامل موارد زیر است:

الف) عمق آب زیرزمینی (D): در این پژوهش، با استفاده از چاه‌های اکتشافی و پیزومترهای واقع در سطح آبخوان و با روش Kriging در علم زمین‌آمار، به درون‌یابی و تهیه لایه اطلاعاتی عمق تا سطح ایستابی اقدام شد که در این دشت، عمق آب زیرزمینی در مناطق شرقی، بیشتر از مناطق غربی بود و به‌طور تقریبی بیش از هشتاد درصد محدوده آبخوان، دارای عمق بیشتر از چهل متر بود و تغییرات عمق آب زیرزمینی در آن، از ۷/۸ تا ۱۳۹/۴ متر در نوسان بود.

ب) تغذیه خالص (R): منابع تغذیه سفره در آبخوان بیرجند شامل نزولات آسمانی، پساب برگشتی به آب‌های زیرزمینی از مصارف نوشیدنی، کشاورزی و صنعت بود.

ج) محیط آبخوان (A): اطلاعات مربوط به محیط آبخوان بیرجند از کاوش‌های زیرسطحی (لوگ حفاری‌های اکتشافی، پیزومتری و چاه‌های بهره‌برداری)، ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی منطقه به‌دست آمد.

د) نوع خاک (S): در این پژوهش، نقشه خاک منطقه براساس آمار و اطلاعات موجود در بایگانی شرکت آب منطقه‌ای، آبخیزداری و سازمان جهاد کشاورزی تهیه، رقومی و طبقه‌بندی شد. محیط خاک شنی، ماسه‌ای، لوم و لوم ماسه‌ای به‌دست آمد.

ه) توپوگرافی (T): در محدوده آبخوان بررسی شده در این پژوهش، برای تهیه نقشه شیب از نقشه‌های SRTM منطقه استفاده شد و برای این منظور، خطوط توپوگرافی تهیه‌شده در نرم‌افزار ArcGIS، با استفاده از الگوریتم D8 به الگوی رقومی شیب تبدیل شد.

و) اثر منطقه غیراشباع (I): نحوه تهیه اطلاعات مربوط به منطقه غیراشباع، همانند محیط آبخوان است؛ با این تفاوت که در این مورد، به دانه‌بندی و ویژگی‌های رسوبات بین سطح آب زیرزمینی و سطح زمین توجه می‌شود.

ز) هدایت هیدرولیکی (C): با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده نفوذپذیری خاک و الگوسازی آن با نرم‌افزار Hydrus، برآورد به‌نسبت دقیقی از هدایت هیدرولیکی در آبخوان انجام گرفت که نتایج نهایی آن با استفاده از آزمایش‌های پمپاژ در منطقه، واسنجی شد.

الگوی دراستیک

الگوی دراستیک را نخستین بار آلر و همکاران (۱۹۸۷) در آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در کل ایالات متحده، بر پایه مفهوم محیط هیدروژئولوژیکی طرح‌ریزی کردند. درحقیقت، محیط هیدروژئولوژیکی توصیف‌کننده ترکیبی از تمام عوامل زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی است که حرکت آب زیرزمینی را در ورود، درون و خروج از سامانه در یک ناحیه تحت تأثیر قرار داده، کنترل می‌کند. این الگو از هفت مؤلفه عمق تا سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی برای بررسی و تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری آبخوان استفاده می‌کند. از تلفیق مؤلفه‌های هفت‌گانه براساس رابطه ۱، شاخص آسیب‌پذیری به دست می‌آید که در آن r ارزش طبقه‌بندی‌شده هر مؤلفه و w وزن هریک از مؤلفه‌هاست.

$$\text{شاخص آسیب‌پذیری دراستیک} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری طبقه‌های مختلف مربوط به هر کدام از مؤلفه‌ها براساس روش استاندارد دراستیک، در محیط GIS انجام می‌گیرد. به هر مؤلفه الگوی دراستیک نسبت به اهمیت هریک از آنها در آسیب‌پذیری، وزنی برابر یک تا پنج اختصاص می‌یابد؛ به مهم‌ترین آنها وزن پنج و به کم‌اهمیت‌ترین آنها وزن یک داده می‌شود (جدول ۱). از تلفیق این مؤلفه‌ها نقشه‌ای به دست خواهد آمد که آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی در مقابل آلودگی در تک‌تک سلول‌ها را به صورت طیف رنگی با مقادیر کمی ۱ تا ۲۵۶ نشان می‌دهد. آسیب‌پذیری آبخوان، قابلیت آبخوان برای آلوده شدن را نشان می‌دهد و نباید با خطر آلودگی اشتباه شود؛ به این معنا که ممکن است در یک منطقه، آسیب‌پذیری کم و متوسط باشد، ولی به دلیل حضور گسترده منابع آلاینده، از نظر آلودگی منطقه پرخطری باشد؛ برعکس، ممکن است در منطقه‌ای آسیب‌پذیری زیاد باشد، ولی به دلیل نبود منابع آلاینده، هیچ‌گونه خطر آلودگی آب زیرزمینی را تهدید نکند.

جدول ۱. مؤلفه‌های الگوی دراستیک و وزن هر کدام

وزن نسبی	توصیف	مؤلفه
۵	عمق از سطح زمین تا سطح ایستابی را بیان می‌کند؛ هرچه عمق بیشتر باشد، خطر آلودگی کمتر است.	عمق تا آب زیرزمینی
۴	مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده، به سطح ایستابی می‌رسد. آب تغذیه‌ای عاملی برای انتقال آلاینده‌هاست و با افزایش آن، خطر آلودگی افزایش می‌یابد.	تغذیه خالص
۳	به ویژگی‌های مواد منطقه اشباع اشاره دارد که فرایندهای رقیق شدن آلاینده‌ها را کنترل می‌کند.	محیط آبخوان
۲	به بخش هوازده بالایی غیراشباع اشاره دارد و مقدار آب نفوذی را کنترل می‌کند.	محیط خاک
۱	به شیب سطح زمین اشاره دارد؛ هرچه شیب کمتر باشد، زمان تماس آب‌های سطحی و آلاینده‌ها با سطح زمین بیشتر است و بنابراین، امکان نفوذ آلاینده‌ها بیشتر است.	توپوگرافی
۵	به‌مثابه مواد منطقه غیراشباع تعریف می‌شود و ورود و رقیق شدن مواد آلاینده را به منطقه اشباع کنترل می‌کند.	منطقه غیراشباع
۳	قابلیت آبخوان را در انتقال آب نشان می‌دهد و هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود.	هدایت هیدرولیکی

تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۱

در اوایل دههٔ هفتاد، توماس ال. ساعتی^۲، روش ساده‌ای را برای کمک به حل مسائل پیچیده برمبنای چهار اصل وارونگی، همگنی، وابستگی و انتظارها بنیانگذاری کرد. این روش که برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه به کار برده می‌شود، فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله‌مراتبی میسر کرده، امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را دارد (تیرومالیویسان، ۲۰۰۳). ضعف این روش این است که اگر حتی یکی از شاخص‌ها یا گزینه‌هایی که مقایسه می‌شود، حذف یا اضافه شود، باید مقایسه‌ها دوباره صورت گیرد و محاسبه‌ها نیز تکرار شود. در اصل، این مشکل ناشی از ماهیت مقایسه‌های دویه‌دوی تمام شاخص‌ها و گزینه‌های ارزیابی شده در این روش است؛ بنابراین لازم است که در تدوین ساختار الگو و انتخاب شاخص‌ها و گزینه‌های مورد مقایسه، نهایت دقت به کار رود. یکی از مهم‌ترین مزایای روش تحلیل سلسله‌مراتبی، داشتن پایهٔ ریاضی است که براساس آن، شاخص سازگاری محاسبه می‌شود و اگر مقدار آن بیشتر از ۰/۱ باشد، نشان از آن دارد که وزن‌های داده شده با همدیگر سازگاری ندارد و باید بازنگری شود. فن AHP، در تعیین اولویت‌های تحقیقاتی، روشی سلسله‌مراتبی است که اساس آن بر درخت سلسله‌مراتبی است. برای تعیین وزن رتبه‌ها و مشخصه‌ها از ماتریس زوجی (اولویت) استفاده می‌شود. این ماتریس ممکن است سازگار یا ناسازگار باشد. در صورت سازگار بودن ماتریس، محاسبهٔ وزن‌ها ساده‌تر و از نرمال کردن عناصر هر ستون به دست می‌آید. همچنین در حالتی که ماتریس ناسازگار باشد، از روش بردار ویژه استفاده می‌شود؛ برای این منظور، ابتدا $A^k \cdot e$ از رابطه‌های ۲ و ۳ به دست می‌آید.

$$A^k \cdot e = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1j} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n a_{nj} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در این رابطه، A ماتریس مربع و وارون پذیر است که شامل اجزای تشکیل دهندهٔ الگوست؛ K توان افزایشی؛ e ترانهادهٔ ماتریس و a_{ij} مقایسهٔ عنصر هر سطر با عناصر ستون‌ها را به صورت یک ماتریس نمایش می‌دهد. در نهایت، حاصل این عبارت بر $e^T \cdot A^k \cdot e$ تقسیم می‌شود:

$$e^T \cdot A^k \cdot e = [1 \ 1 \ \dots \ 1] \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1j} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n a_{nj} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (3)$$

حاصل عبارت $\frac{A^k \cdot e}{e^T \cdot A^k \cdot e}$ عبارت است از به توان K رساندن ماتریس A ، سپس جمع سطرها با هم و تشکیل

1. Analytical Hierarchy Process.(AHP)

2. Tomas L.Saaty

برداری ستونی و در پایان، نرمالیزه کردن بردار حاصل. همچنین، معیار تصمیم‌گیری برای گزینش وزن انتخابی، استفاده از معیار مقدار ناسازگاری ماتریس است که نتایج عدد کمتر از ۰/۱ را به مثابه معیار انتخاب کرده است (ساعتی). یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای ارتقای وزن و رتبه‌های الگوی دراستیک با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، در نظر داشتن غلظت نیترات در چاه‌های مشاهده‌ای است. یکی از مزایای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام‌گرفته برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارهاست و نیز بررسی آنکه در تشکیل ماتریس زوجی معیارها، چقدر سازگاری در قضاوت‌ها رعایت شده است. مقدار شاخص ناسازگاری (I.I) از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$I.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (۴)$$

که در آن، λ_{\max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس و n اندازه ماتریس است. همچنین، مقدار ناسازگاری (I.R) از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$I.R = \frac{I.I}{I.I.R} \quad (۵)$$

در این رابطه، I.I.R شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی است.

بررسی وضعیت نیترات در آبخوان

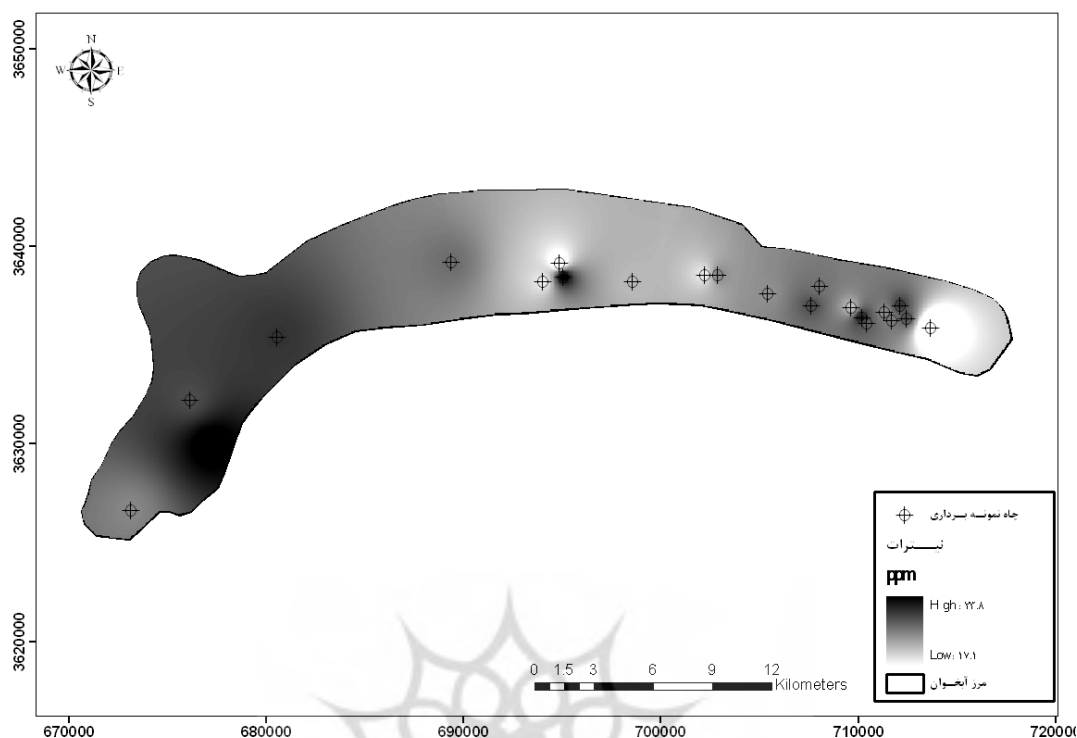
یکی از آلاینده‌های مهم و تأثیرگذار در محیط زیست، نیترات است. این مؤلفه با تبدیل شدن به نیتريت، سبب بروز بسیاری از بیماری‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. سازمان بهداشت جهانی، استاندارد نیترات را حداکثر پنجاه میلی‌گرم در لیتر دانسته و روش اسمز معکوس را یکی از روش‌های مناسب برای تصفیه آب‌های آلوده معرفی کرده است (WHO). نیتروژن ماده مغذی‌ای (کود) است که به مقدار زیاد در چمنزارها، باغ‌ها و محصولات کشاورزی کاربرد دارد. افزون بر کود، نیتروژن، در خاک به فرم آلی از تجزیه گیاهان و حیوانات به وجود می‌آید. فرم‌های مختلف نیتروژن در خاک را باکتری‌ها به نیترات (یون NO_3) تبدیل می‌کنند که از طریق لایه‌های خاک به زمین نفوذ کرده، بر اثر بارش یا آبیاری‌های شدید، به ریشه گیاهان و در نهایت، به آب‌های زیرزمینی می‌رسد. منشأ اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات، یا منابع نقطه‌ای مانند دفع فاضلاب و دامداری‌هاست یا منابع غیرنقطه‌ای مانند مصرف کود کشاورزی در پارک‌ها، زمین‌های گلف، چمنزارها و باغ‌ها. حفر چاه آب در محل مناسب و بهسازی آن، در کاهش بار آلودگی به نیترات مؤثر است. در این طرح، به منظور بررسی آسیب‌پذیری به روش دراستیک، از داده‌های نیترات مشاهده‌ای آزمایش شده در سال ۱۳۹۰ در آبخوان بیرجند استفاده شد. جدول ۲ موقعیت چاه‌های آزمایش شده و شکل ۹ پهنه‌بندی نیترات را در آبخوان نشان می‌دهد.

1. I.I= Inconsistency Index

2. I.R= Inconsistency Ratio

جدول ۲. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای نیترات در آبخوان بیرجند

شماره چاه	UTM Y	UTM X	غلظت نیترات (ppm)	شماره چاه	UTM Y	UTM X	غلظت نیترات (ppm)	شماره چاه	UTM Y	UTM X	غلظت نیترات (ppm)
۲۲	۳۶۲۶۳۳۱	۷۱۱۷۲۳	۲۲/۶	۹	۳۶۳۸۵۷۱	۷۰۲۲۲۲	۲۲/۳	۱	۳۶۳۶۰۹۹	۷۱۰۴۲۶	۲۲/۳
۲۲/۶	۳۶۲۲۲۲۰	۶۷۶۱۵۵	۲۱/۹	۱۰	۳۶۳۸۵۷۱	۷۰۲۹۱۶	۲۲/۳	۲	۳۶۳۶۳۹۱	۷۱۰۱۹۶	۲۲/۳
۲۳/۸	۳۶۲۹۹۸۳	۶۷۷۲۲۸	۲۲/۶	۱۱	۳۶۳۷۰۲۶	۷۰۷۶۵۸	۲۲/۹	۳	۳۶۳۷۰۲۵	۷۱۲۱۵۳	۲۲/۹
۲۱/۹	۳۶۲۶۶۲۷	۶۸۳۱۳۵	۱۹/۵	۱۲	۳۶۳۹۱۴۱	۶۹۴۸۶۳	۲۱/۱	۴	۳۶۳۶۸۹۹	۷۰۹۶۵۰	۲۱/۱
۲۲/۹	۳۶۲۵۴۲۸	۶۸۰۵۸۲	۲۰/۶	۱۳	۳۶۳۸۲۰۸	۶۹۴۰۴۷	۲۲/۶	۵	۳۶۳۶۳۵۹	۷۱۲۴۵۱	۲۲/۶
۲۲/۲	۳۶۲۹۱۹۱	۶۸۹۳۷۶	۲۲/۱	۱۴	۳۶۳۷۹۸۸	۲۰۷۰۸۰۵۷	۲۱/۸	۶	۳۶۳۶۶۸۸	۷۱۱۳۳۵	۲۱/۸
			۲۱/۸	۱۵	۳۶۳۷۶۳۴	۷۰۵۴۱۳	۱۷/۱	۷	۳۶۳۵۸۵۵	۷۱۳۶۸۵	۱۷/۱
			۲۱/۳	۱۶	۳۶۳۸۲۲۸	۶۹۸۵۷۲	۲۳/۸	۸	۳۶۳۸۴۶۹	۶۹۵۰۸۰	۲۳/۸



شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و پهنه‌بندی نیترات در آبخوان

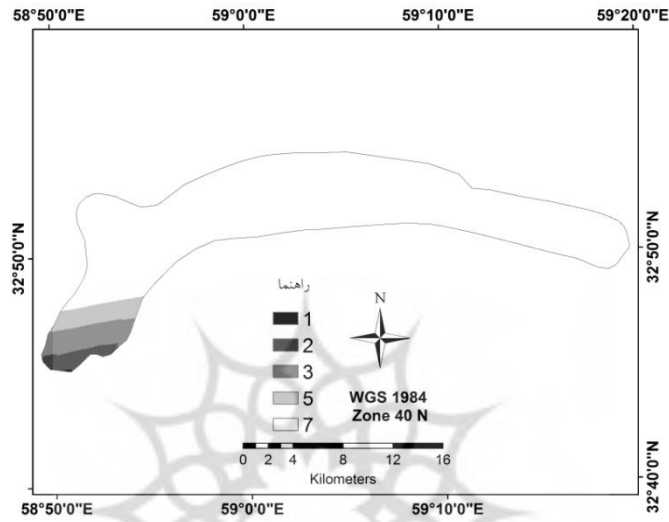
یافته‌های پژوهش

تهیه مؤلفه‌های الگوی دراستیک

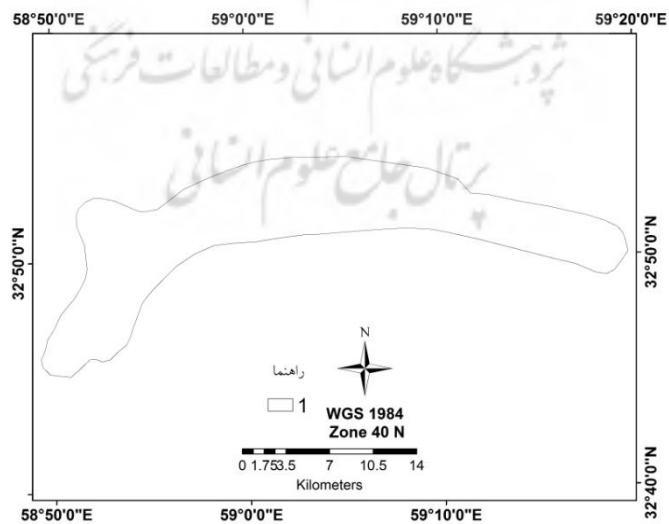
با استفاده از ابزارهای درون‌یابی و طبقه‌بندی در نرم‌افزار ArcGis10.2، هفت لایه الگوی دراستیک مطابق شکل‌های ۳ تا ۹ به دست آمد. براساس نتایج اولیه، خروجی آبخوان دارای بیشترین وزن در مؤلفه‌های عمق تا سطح ایستابی و شیب بود. همچنین، مقدار تغذیه آبخوان در دو قسمت مناطق شهری با توجه به آب برگشتی، در وزن بیشتری نسبت به دیگر مناطق آبخوان بود. با توجه به لوگ‌های حفاری، آزمایش‌های نفوذ، آزمایش‌های خاکشناسی و ...، محیط آبخوان در دو دسته، محیط خاک در چهار دسته و محیط غیراشباع در سه دسته و همچنین، با توجه به نتایج آزمایش‌های خاکشناسی و نفوذ مؤلفه هدایت هیدرولیکی در سه دسته طبقه‌بندی شد.

با استفاده از آمار سطح ایستابی در پیزومترهای آبخوان بیرجند (سال ۱۳۹۰) و روش‌های درون‌یابی کریجینگ، سطح آب زیرزمینی در محیط GIS پهنه‌بندی شد و طبقه‌بندی آن انجام گرفت. نتایج این طبقه‌بندی، حاکی از حساس بودن آبخوان در مناطق خروجی با توجه به بالا بودن سطح ایستابی بود. برای برآورد تغذیه آبخوان با استفاده از میانگین درازمدت بارندگی ایستگاه سینوپتیک بیرجند و آب برگشتی از چاه‌های شرب و کشاورزی و با در نظر گرفتن ضریب آب برگشتی (بسیست درصد کشاورزی، هفتاد درصد شرب، ده درصد نفوذ ناشی از بارندگی و دوازده درصد نفوذ ناشی از سیلاب) پهنه‌بندی و طبقه‌بندی آن مطابق شکل ۴ انجام گرفت. براساس نتایج لوگ حفاری، آزمایش‌های خاکشناسی،

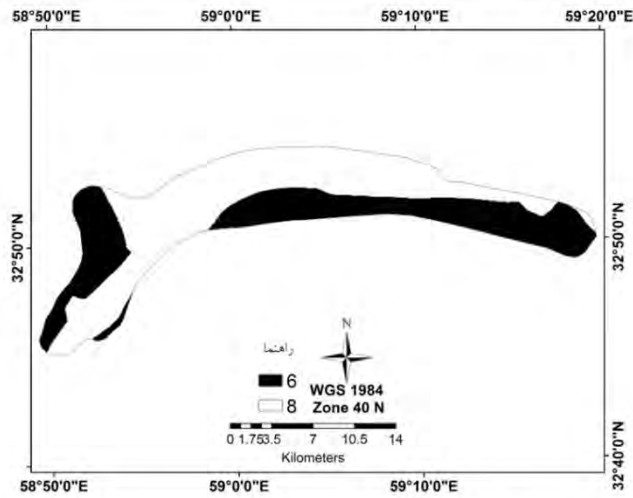
آزمایش پمپاژ، تصاویر ماهواره‌ای و ...، پهنه‌بندی و طبقه‌بندی محیط آبخوان، محیط خاک آبخوان و محیط غیراشباع به‌دست آمد. همچنین، با استفاده از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری و تهیه الگوی رقومی ارتفاع (DEM) و استفاده از برنامه 3D Analyst، نقشه شیب آبخوان ترسیم شد. برای برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان با استفاده از نتایج آزمایش پمپاژ و ژئوفیزیک آبخوان از یک سو و برآورد هدایت هیدرولیکی براساس محیط غیراشباع از سوی دیگر، پهنه‌بندی و طبقه‌بندی محیط آبخوان انجام گرفت.



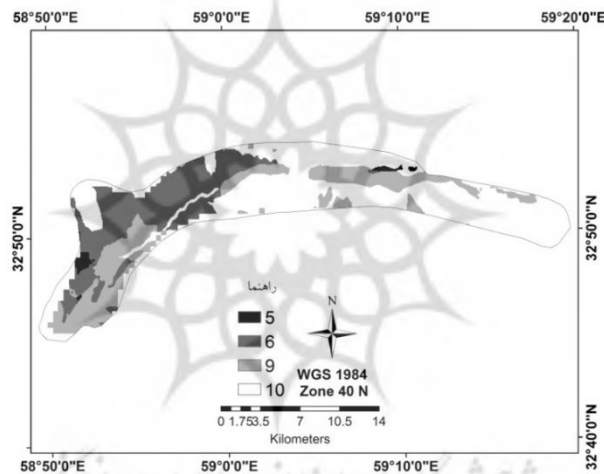
شکل ۳. عمق تا سطح ایستابی



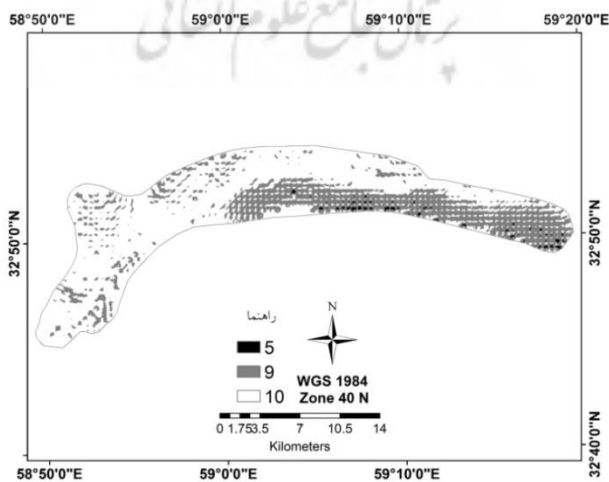
شکل ۴. تغذیه آبخوان



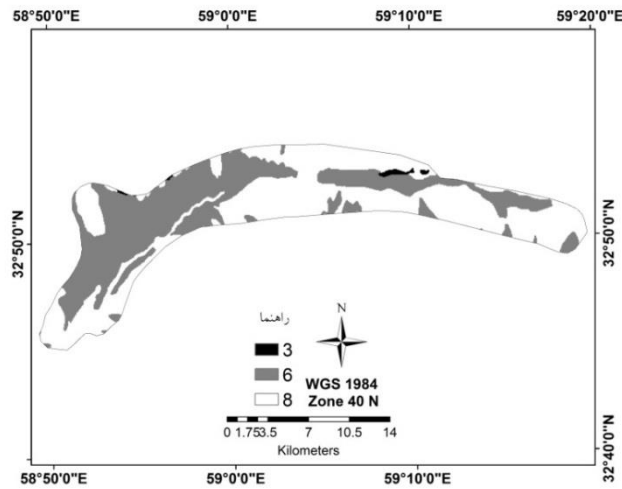
شکل ۵. محیط آبخوان



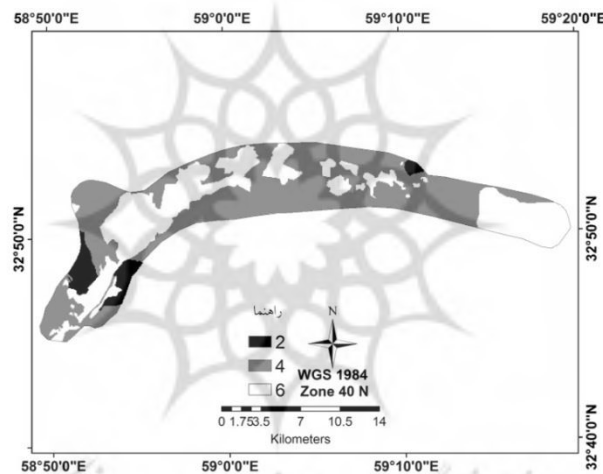
شکل ۶. خاک آبخوان



شکل ۷. شیب منطقه



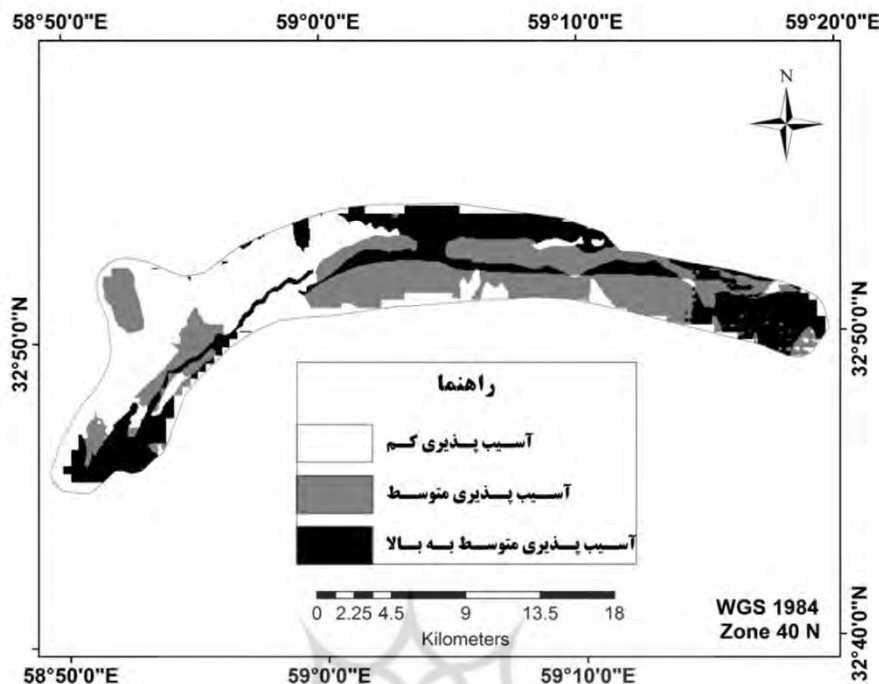
شکل ۸. محیط غیراشباع



شکل ۹. هدایت هیدرولیکی

ارزیابی شاخص دراستیک

پس از تهیه مؤلفه‌های لازم برای ارزیابی آسیب‌پذیری به روش دراستیک، تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت بیرجند آغاز شد. با تلفیق مؤلفه‌ها براساس رابطه ۱ محاسباتی دراستیک، لایه شبکه‌ای به‌دست آمد که در آن، سلول‌های دارای اعداد بزرگ‌تر بیان‌کننده مناطقی است که در آنها، آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی از آلودگی بیشتر است و سلول‌های دارای ارزش عددی کمتر، مناطقی را نشان می‌دهد که در آنها، آسیب‌پذیری ذاتی آب‌های زیرزمینی از آلودگی کمتر است. در الگوی دراستیک، شاخص نهایی حاصل ضرب ارزش عددی رتبه‌بندی‌شده هر مؤلفه در وزن آن مؤلفه است. در این پژوهش، با استفاده از هفت مؤلفه محیطی که برای نشان دادن وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان منطقه بررسی شد، نقشه‌های الگوی دراستیک تهیه شد و با استفاده از این نقشه‌ها شاخص آسیب‌پذیری که از ترکیب خطی مؤلفه‌های دراستیک به‌دست می‌آید، محاسبه شد.



شکل ۱۰. الگوی دراستیک در آبخوان بیرجند

جدول ۳. طبقه‌بندی شاخص دراستیک در محدوده آبخوان بیرجند

محدوده دراستیک	شاخص دراستیک
۶۳-۷۹	آسیب‌پذیری بسیار کم
۷۹-۹۹	آسیب‌پذیری کم
۹۹-۱۱۹	آسیب‌پذیری متوسط
۱۱۹-۱۳۹	آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد

واسنجی الگوی دراستیک با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی

ضریب ناسازگاری یکی از قیده‌های مهم برای بهینه‌سازی ضرایب و وزن‌های الگوی دراستیک است. با توجه به نتایج پژوهش‌ها و ارزش‌سنجی استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مقدار ضریب ناسازگاری کمتر از $0/08$ به‌مثابه گزینه برتر برای تحلیل انتخاب شد. نتایج الگوسازی برای واسنجی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و با در نظر گرفتن مقدار پهنه‌بندی شده نیترا، مطابق جدول ۴ بیان شده است.

جدول ۴. وزن و رتبه‌های واسنجی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی

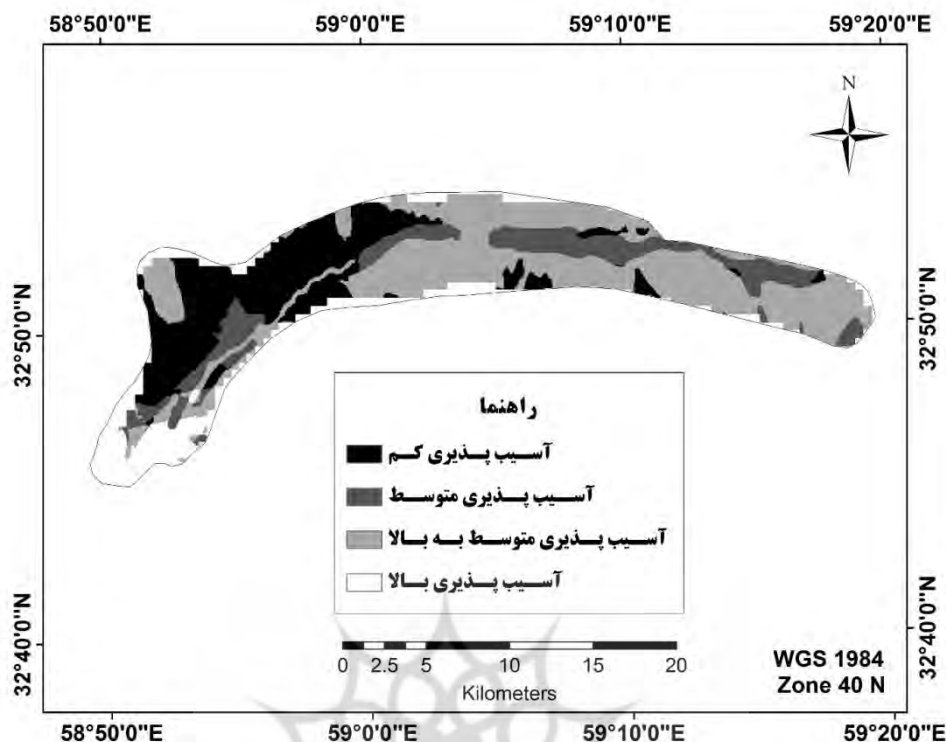
نام مؤلفه		وزن					رتبه
عمق تا سطح ایستایی	۰/۳۱۴	۱	۲	۳	۵	۷	
	۰/۴۶۹	۰/۲۶۷	۰/۱۴۱	۰/۰۸۲	۰/۰۴۱		
شیب	۰/۰۳۱	۵	۹	۱۰			
	۰/۶۶۷	۰/۲۲۲	۰/۱۱۱				
هدایت هیدرولیکی	۰/۱۸۶	۲	۴	۶			
	۰/۶۶۷	۰/۲۲۲	۰/۱۱۱				
محیط غیراشباع	۰/۱۸	۳	۶	۸			
	۰/۷۳۱	۰/۱۸۸	۰/۰۸۱				
محیط خاک	۰/۰۷۲	۲	۴	۵	۶		
	۰/۴۶۹	۰/۳۱۵	۰/۱۳۷	۰/۰۷۹			
تغذیه	۰/۱۶۶	۱	۳				
	۰/۷۵	۰/۲۵					
محیط آبخوان	۰/۰۵۱	۶	۸				
	۰/۷۵	۰/۲۵					

Priorities with respect to:
Goal: DRASTIC-Model



Inconsistency = 0.08
with 0 missing judgments.

شکل ۱۱. برآورد مؤلفه‌های الگوی دراستیک با مقدار ناسازگاری



شکل ۱۲. طبقه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان بیرجند براساس شاخص دراستیک با وزن‌های الگوی تحلیل سلسله‌مراتبی

شکل ۱۲ بیان‌کننده نتایج نهایی شاخص دراستیک پس از واسنجی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی است که حاکی از زیاد بودن احتمال آلودگی در مناطق غربی (خروجی) آبخوان است. با توجه به مؤلفه‌های الگوی دراستیک و تأثیر عمق تا سطح آب زیرزمینی که در بسیاری از مناطق آبخوان زیاد است، محیط غیراشباع و پس از آن، محیط خاک تأثیر بسزایی بر پهنه‌بندی شاخص دراستیک دارد.

نتیجه‌گیری

شناسایی مناطق حساس به آلودگی تأثیر بسزایی بر توسعه داشته و استفاده از ابزارهای جدید سبب سهولت این شناسایی شده است. در این پژوهش، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و شاخص آسیب‌پذیری دراستیک، مناطق حساس به آلودگی در سفره آب زیرزمینی بیرجند تجزیه و تحلیل شد. این شاخص مشتمل بر هفت مؤلفه از ویژگی‌های آبخوان است که هر یک از آنها تأثیری بر وضعیت آلودگی سفره آب زیرزمینی دارد. نتایج الگوی دراستیک نشان داد که این الگو دقت کافی در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر نداشته، نیاز به واسنجی وزن‌ها و رتبه‌های الگو دارد. بنابراین، در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، نرم‌افزار Expert choice و داده‌های مشاهده‌ای نترات در سطح آبخوان بیرجند، واسنجی الگو انجام گرفت. از این‌رو، در این طرح هفت مؤلفه ورودی الگوی دراستیک به‌همراه رتبه‌های داخلی آنها تحلیل و واسنجی شد. تحلیل و واسنجی شاخص دراستیک با توجه به وزن و رتبه‌های اولیه الگو و قید ضریب ناسازگاری، با استفاده از بردار ویژه وزن انجام گرفت و ضریب ناسازگاری به مقدار ۰/۰۸ به‌دست آمد. با استفاده از

وزن‌های به‌دست‌آمده از الگوی تحلیل سلسله‌مراتبی، تحلیل وزن‌های الگوی دراستیک اصلاحی در سطح آبخوان بیرجند مطابق شکل ۱۲ انجام گرفت که نتایج آن حاکی از رابطه همبستگی زیاد بین وزن‌های اصلاح‌شده با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و غلظت نیترات است. همچنین، نتایج نهایی حاکی از ارتباط زیاد عمق آب زیرزمینی، محیط غیراشباع و محیط خاک با نتایج نهایی شاخص دراستیک اصلاح‌شده است.

منابع

- احمدی، ج.، آخوندی، ل.، عباسی، ه.، خاشعی سیوکی، ع. و علیمددی، م. (۱۳۹۲). «تعیین آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از مدل دراستیک و اعمال آنالیز حساسیت تک‌پارامتری و حذفی (مطالعه موردی: دشت سلفچگان - نیزار)». *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ج ۲۰. ش ۳. ص ۱-۲۵
- افروزی، م. و محمدزاده، ح. (۱۳۹۲). «ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان بروجن - فردانیه با استفاده از مدل دراستیک براساس نیترات». *مجله پژوهش آب ایران*. س ۷. ش ۱۲. ص ۲۱۳-۲۱۸.
- کریمی شاه‌ملکی، ن.، بهبهانی، س.م.، مساح بوانی، ع. و خدایی، ک. (۱۳۹۱). «مقایسه روش‌های Logistic Regression، دراستیک اصلاح‌شده و DRASTIC-AHP در بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی». *مجله محیط‌شناسی*. س ۳۸. ش ۴. ص ۷۹-۹۲.
- محمدزاده، ا.، رضاییان، س. و احمدی، آ. (۱۳۹۲). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت میمه اصفهان با استفاده از روش‌های تطبیقی DRASTIC، GODS، AVI». *مجله محیط‌شناسی*. س ۳۹. ش ۲. ص ۴۵-۶۰.
- معروفی، ص.، سلیمانی، س.، قبادی، م.ح.، رحیمی، ق. و معروفی، ح. (۱۳۹۱). «ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملایر با استفاده از مدل‌های DRASTIC، SI، SINTACS». *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ج ۱۹. ش ۳. ص ۱۴۲-۱۶۶.
- Afrozi, M. and Mohamadzadeh, H. (2013). "Aquifer vulnerability assessment Borujen-Faradonbeh Using DRASTIC model based on nitrate". *Journal of Iran Water Researches*. Year, 7. No. 12. pp. 213-218. (In Persian).
- Ahmadi, J., Akhundi, L., Abbasi, H., Khasheii-Sivaki, A. and Alimadadi, M. (2013). "Determine aquifer vulnerability using DRASTIC model and apply single parameter sensitivity analysis and elimination (Case study: Plain Salafchegan-Reedy)". *Journal of researches Protection soil and water*. Vol. 20. No. 3. pp. 1-25. (In Persian).
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G. (1987). "DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings". EPA-600/2-87-035. Ada, Oklahoma: U.S. Environmental Protection Agency.
- Akhavan, S., Mousavi, F., Abedi-Koupai, J. and Abbaspour, K. (2010). "Conditioning DRASTIC model to simulate nitrate pollution case Study: Hamadan° Bahar plain. *Environmental Earth Science*". DOI: 10.1007/s12665-010-0790-1.
- Boughriba, M., Barkaoui, A., Zarhloule, Y., Lahmer, Z., El-Houadi, B. and Verdoya, M. (2010). "Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment". *Arabian Journal of Geosciences*. 3. pp. 207° 220.
- Fijani, E., Nadiri, A., Asghari-Moghaddam, A., T.-C. Tsai, T. and Dixon, B. (2013). "Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh° Bonab plain aquifer, Iran". *Journal of Hydrology*. 503. pp. 89-100.
- Gogu, R.C. and Dassargues, A. (2000). "Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods". *Environmental Geology*. 39. pp. 549-559.
- Karami-Shahmolki, N., Behbahani, S.M, Masah-Boani, A and Khodaei, K. (2012). "Comparison of Logistic Regression, aquifer and groundwater vulnerability AHP DRASTIC- review". *Journal of Environmental*. Year 38. No. 4. pp. 79-92. (In Persian).
- Mahmoud-zadeh, A., Rezaian, S. and Ahmadi, A. (2012). "Aquifer Vulnerability Assessment Meymeh plain of using comparative methods DRASTIC, GODS, AVI". *Journal of Environmental*. Year 39. No. 2. pp. 45-60. (In Persian).

- Marofi, S., Soleymani, S., Ghobadi, M.H., Rahimi, GH. And Marofi, H. (2011). "Vulnerability Assessment Malayer plain of using Models DRASTIC, SI, SINTACS). Journal of researches Protection soil and water. Vol. 19. No 3. pp. 142-166. (In Pershian).
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S. and Zulhaidi Mohd Shafri, H. (2013). "Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran". Environ Earth Sci. 13 pages.
- Rakad, A., Taşkın, Mohammad A. 1 1 . Alaween, 2Mustafa, M., Al-Kuisi and 1Naser M. Al-Manaseer (2013). "GIS Based Model of Groundwater Vulnerability and Contamination Risk of Wadi Kufrinja Catchment Area". Jordan. World Applied Sciences Journal. 24 (5). pp. 570-581.
- Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill International.
- Sener, E. and Davraz, A. (2012). "Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey)". Hydrogeology Journal. 21. pp. 701° 714.
- Thirumalaivasan, D., Karmegam. M. and Venugopal, K. (2003). "AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS". Environmental Modelling & Software. 18. pp. 645° 656.
- Tirkey, P., Gorai, A.K. and Iqbal, J. (2013). "AHP-GIS Based DRASTIC Model for Groundwater Vulnerability to Pollution Assessment: A Case Study of Hazaribag District, Jharkhand". India. International Journal of Environmental Protection. Vol. 2. Iss. 3. pp. 20-31.
- Victor Rodriguez-Galiano, Maria Paula Mendes, Maria Jose Garcia-Soldado, Mario Chica-Olmo and Luis Ribeiro (2014). "Predictive modeling of groundwater nitrate pollution using Random Forest and multisource variables related to intrinsic and specific vulnerability: A case study in an agricultural setting (Southern Spain)". Science of the Total Environment. Vol. 476° 477. pp. 189° 206.
- Vrba, J. and Zoporozec, A. (1994). "Guidebook on mapping groundwater vulnerability". International Contribution for Hydrogeology. Hannover Heise. p. 16.
- US EPA (Environmental Protection Agency). (1985). "DRASTIC: a standard system for evaluating groundwater potential using hydrogeological settings". Ada, Oklahoma WA/EPA Series. p. 163.