

ارزیابی پتانسیل آلودگی و آنالیز حساسیت آب زیرزمینی در آبخوان خاتون آباد با استفاده از مدل دراستیک مبتنی بر GIS

محمد نخعی

گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

وهاب امیری

دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

مهدی رحیمی شهربابکی

کارشناس ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه زاهدان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۳

vahab.amiri@gmail.com

چکیده

منطقه مورد مطالعه، دشت خاتون آباد در استان کرمان و ۴۰ کیلومتری شرق شهر بابک می باشد. در این تحقیق با توجه به ویژگی های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت خاتون آباد، آسیب پذیری این آبخوان در برابر عوامل آلاینده پهنه بندی شده است. به این منظور از مدل دراستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) جهت پردازش و تجزیه و تحلیل کیفی آبخوان استفاده شده است. نام مدل دراستیک از حروف اول پارامترهای مؤثر در ارزیابی آلودگی سفره آب زیرزمینی گرفته شده است. این پارامترها شامل: عمق سطح ایستابی، شبکه تغذیه، جنس سفره، نوع خاک، شیب توپوگرافی، منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع می باشد که بصورت هفت لایه در نرم افزار Arc View تهیه شدند و با وزن دهی و رتبه بندی و تلفیق هفت لایه فوق، شاخص دراستیک برای کل منطقه بین ۹۱ تا ۱۵۵ برآورد گردید. در نهایت، با طبقه بندی نقشه شاخص دراستیک به چهار کلاس بدون ریسک، آسیب پذیری کم، آسیب پذیری متوسط و آسیب پذیری شدید، نقشه آسیب پذیری آبخوان نسبت به آلودگی تهیه گردید. جهت صحت سنجی مدل تهیه شده از یون نیترات استفاده شد. با انطباق نقاط غلظت نیترات بر روی نقشه شاخص دراستیک، مشخص گردید که هیچ یک از نقاطی که دارای نیترات بالا هستند در محدوده با استعداد آلودگی کم قرار نگرفته است که این می تواند دقت و صحت مدل را مورد تأیید قرار دهد. از نظر وسعت نیز حدود ۳۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در محدوده آسیب پذیری کم و ۷۰ درصد باقیمانده در محدوده آسیب پذیری متوسط قرار می گیرد. محدوده آسیب پذیری متوسط در قسمت های وسیعی از شمال غربی، غرب و مرکز را در بر می گیرد و این قسمت ها برای جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی منطقه باید مراقبت و کنترل بیشتری شود.

کلمات کلیدی: آبخوان خاتون آباد، استعداد آلودگی، دراستیک، GIS، آنالیز حساسیت

مقدمه

نهایت نقشه آسیب پذیری ارائه می شود. دراستیک متداول ترین روش برای ارزیابی حساسیت آبخوان است هر چند که هدف آن پیش بینی وقوع آلودگی در آب زیرزمینی نیست. البته برخی کاربردهای دراستیک برای این منظور موفق و برخی نیز ناموفق بوده اند (Adamat et al., 2003). تاکنون مطالعات متعددی در زمینه استعداد آلودگی آبخوان با استفاده از روش دراستیک انجام شده است. (چیت سازان و اختری، ۱۳۸۵) با بکارگیری روش دراستیک در دشت های زورچری و خران نشان دادند که بخش غرب و جنوب غربی این آبخوان دارای آسیب پذیری متوسط است و نواحی کوچکی در شمال غرب و شرق منطقه مورد مطالعه در محدوده بدون خطر آلودگی قرار می گیرند. سایر بخش های آبخوان نیز آسیب پذیری پایینی را نشان می دهند. همچنین نتایج آنالیز نیترات نمونه های آب زیرزمینی نشان داد که میزان نیترات در بخش غرب و جنوب غربی آبخوان بیش از میزان نیترات موجود در سایر بخش های آبخوان است (چیت سازان و اختری، ۱۳۸۵). (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸) در مطالعه ای که به منظور ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی دشت های بازگان و پلدشت با استفاده از روش دراستیک انجام شد نشان دادند که حدود ۳ درصد از منطقه مورد مطالعه در محدوده آسیب پذیری کم، ۳۷ درصد متوسط و ۶۰ منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و استفاده از آن در شرب، کشاورزی و پرورش آبزیان، حفاظت این مناطق به منظور جلوگیری از آلودگی و

امروزه ارزیابی استعداد آلودگی منابع آب زیرزمینی به طرز روز افزونی توسط کشورها و آژانس های دولتی در حال افزایش است (Rahman, 2008). علاوه بر این، تهیه نقشه نقاط مستعد آلودگی می تواند به عنوان کمک کننده ای برای دستگاه های تصمیم گیرنده در جهت حفاظت منابع آب زیرزمینی به عنوان منابع با ارزش و استراتژیک هر کشور باشد و امکان تعیین مناطق قابل حفاظت از هر آبخوان را بوجود آورد (Tilahun and Merkel, 2009). بزرگ ترین مزیت تهیه نقشه با استفاده از GIS، امکان انجام بهترین ترکیب و ادغام لایه های اطلاعاتی و تغییر سریع در پارامتر داده های استفاده شده در طبقه بندی استعداد آلودگی یک آبخوان است (Wang et al., 2007). یکی از راه های پیشگیری آلودگی آب زیرزمینی شناسایی مناطقی است که استعداد آلوده شدن بالایی دارند و به وسیله این شناخت می توان منطقه را از نظر آسیب پذیری پهنه بندی نمود و در نتیجه با اعمال تمهیدات لازم از آلوده شدن مناطق با آسیب پذیری بالا جلوگیری نمود. یکی از کاربردی ترین مدل های کیفی به منظور ارزیابی آسیب پذیری روش دراستیک (DRASTIC) است. در این روش، پارامترهای مختلف هیدروژئولوژیکی که هر یک در انتقال آلودگی تأثیر گذارند با یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش با یکدیگر جمع شده و در محدوده آسیب پذیری زیاد قرار می گیرد که قسمت های وسیعی از شرق، غرب و بخشی از مرکز را شامل می شود. علاوه بر این، با توجه به حجم زیاد

مدیریت بهینه منابع آب ضروری است (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸). (آزاد شهری و همکاران، ۱۳۸۹) در مطالعه‌ای تحت عنوان ارزیابی پتانسیل و آنالیز حساسیت آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت هشتگرد به روش دراستیک نشان دادند که پهنه‌بندی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت هشتگرد با نقشه نیرت‌آب زیرزمینی تطابق قابل قبولی نشان می‌دهد و بیشترین درصد پتانسیل آسیب‌پذیری مربوط به کلاس متوسط بوده و مناطق شمالی دشت دارای میزان آسیب‌پذیری بالایی هستند و نواحی جنوبی دشت کمترین آسیب‌پذیری را دارا می‌باشند (آزادشهرکی و همکاران، ۱۳۸۹). با توجه به اینکه دشت خاتون آباد تأمین کننده آب مورد نیاز مجتمع مس سرچشمه به عنوان یکی از ارکان اقتصادی کشور می‌باشد و از نظر توسعه کشاورزی نیز یکی از دشت‌های مهم استان کرمان محسوب می‌گردد، لذا حفاظت و حراست از منابع آبی این دشت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی، آلودگی منابع آب زیرزمینی در اثر فعالیت‌های انسانی از مهمترین مشکلات مدیران منابع آب می‌باشد و به همین منظور، شناسایی ساختار هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی این آبخوان و پهنه‌بندی حساسیت آن نسبت به آلودگی می‌تواند مدیران منابع آب را جهت کنترل آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی در مناطق آسیب‌پذیر یاری نماید.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در شمال غربی استان کرمان، بین طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی قرار گرفته است. این محدوده از شمال به نواحی کوهستانی میمند و کرم که عمده منبع تغذیه آبخوان زیرزمینی را تشکیل می‌دهند، از شرق به محدوده مطالعاتی سرچشمه، از جنوب به محدوده پهنه‌های کویری و شوره‌زار سیرجان و از غرب به محدوده مطالعاتی شهربابک و کویر سیرجان محدود می‌شود. ارتفاعات شمالی و شرقی در بالاترین نقطه نسبت به دشت ۱۲۰۰ متر اختلاف ارتفاع دارند. بیشترین اختلاف ارتفاع در این دشن ۱۵۰ متر می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام شده، آبخوان دشت خاتون‌آباد از نوع آزاد بوده و عمق آبهای زیرزمینی در اکثر نقاط کمتر از ۶۰ متر می‌باشد. حدود آبخوان بر اساس مجموعه اطلاعات هیدروژئولوژیکی به ویژه نقشه‌های منابع آب، نقشه‌های ایزوپیز و تیسن مشخص شده و به این ترتیب مساحت محدوده بیان آب زیرزمینی آبخوان ابرفتی خاتون‌آباد ۴۱۲ کیلومترمربع تعیین شده است. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به کیفیت مناسب آب این آبخوان و نبود جریان‌ات سطحی دائمی، تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، صنعت (از جمله کارخانجات ذوب مس سرچشمه و کارخانه فرآوری مولیبدن) و شرب تقریباً به طور کامل از طریق منابع آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. تخلیه از آبخوان برای مصارف ذکر شده توسط چاه‌های عمیق و نیمه عمیق صورت می‌گیرد. متوسط تخلیه سالیانه از این آبخوان در حدود ۶۷ میلیون متر مکعب می‌باشد.

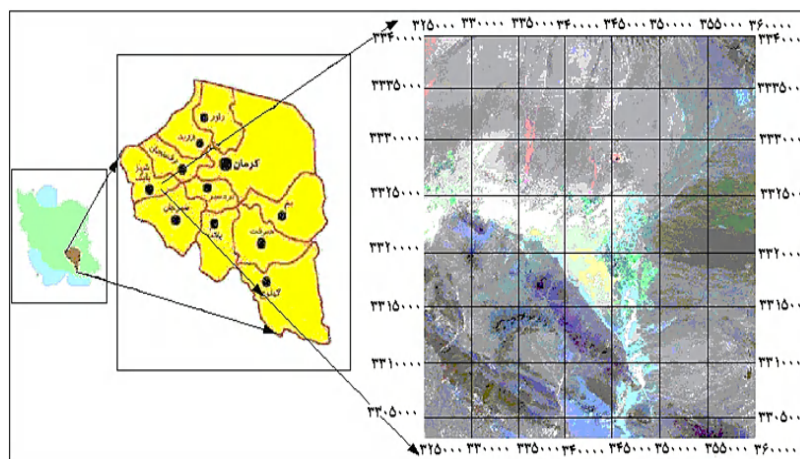
روش مطالعه

در این تحقیق، از مدل دراستیک به منظور ارزیابی پتانسیل آلودگی سفره زیرزمینی دشت خاتون آباد استفاده شده است. مدل دراستیک نخستین بار در سال ۱۹۸۷ توسط آلر معرفی شد و آنانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) آنرا در سال ۱۹۹۰ توسعه داد که به این طریق بتوانند از این مدل به عنوان یک سیستم استاندارد شده جهت ارزیابی پتانسیل آلودگی آبهای زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد (Boughriba et al, 2009). امروزه مدل

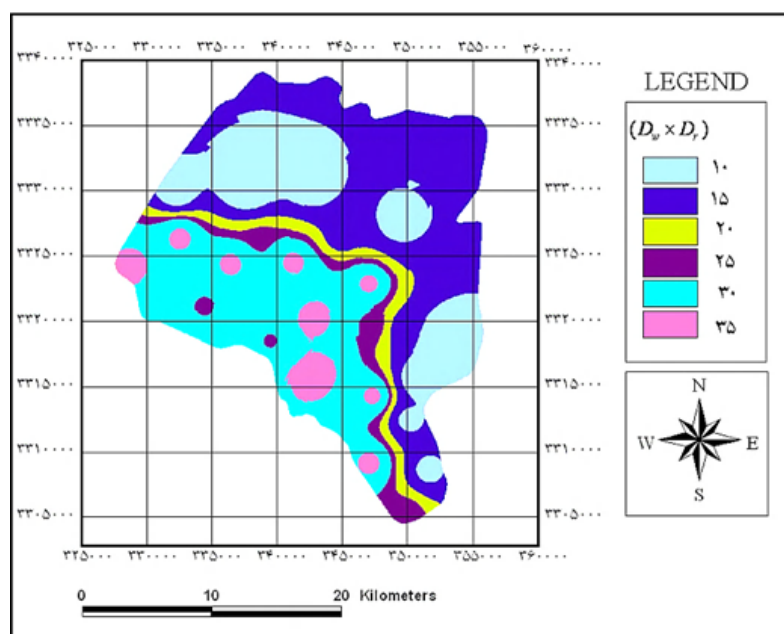
تهدیه لایه‌ها

لایه عمق آب زیرزمینی (D)

عمق سطح ایستابی به این دلیل که ضخامت از مواد را در بر می‌گیرد که آب نفوذی قبل از رسیدن به سفره باید از آن عبور کند، دارای اهمیت زیادی در انتقال آلودگی‌های احتمالی است. عموماً با افزایش عمق آب پتانسیل آلودگی سفره کاهش می‌یابد (Voudouris et al., 2010). با توجه به اینکه عمق سطح ایستابی تأثیر زیادی در پتانسیل آلودگی یک سفره دارد، وزن ۵ (بیشترین وزن) به این عامل اختصاص داده می‌شود. به منظور تهیه لایه عمق آب زیرزمینی، از آمار سطح آب در پیژومترهای دشت استفاده شد. در ادامه، درونبایی داده‌های سطح آب در محیط Arc View، با روش IDW و با بهره‌گیری از مقدار سطح آب در هر پیژومتر انجام شد. لایه درونبایی ایجاد شده از نوع رستر بوده و تحت عنوان عمومی DEM یا مدل رقومی ارتفاع نامیده می‌شود. پس از تهیه لایه درونبایی، این لایه طبق (جدول ۱) به هفت کلاس رتبه‌بندی شد. در نهایت با توجه به وزن لایه D که ۵ می‌باشد، لایه فوق در عدد ۵ ضرب گردید و نقشه نهایی عمق بدست آمد. (شکل ۲) لایه عمق منطقه را نشان می‌دهد. در این شکل حرف D نشان‌دهنده پارامتر دراستیک (عمق آب زیرزمینی) و اندیس Γ و w به ترتیب نشان‌دهنده رتبه و وزن پارامتر می‌باشد و $(D_w \times D_r)$ ارزش عددی هر پلی‌گون را بر روی نقشه نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه رتبه‌بندی عمق آب زیرزمینی

ادامه با توجه به متأثر بودن میزان نفوذ باران از جنس خاک، اقدام به تهیه نقشه کاربری منطقه با استفاده از تصویر ماهواره‌ای شد. در مرحله بعد با توجه به اینکه ضریب نفوذ باران تابعی از نوع خاک و شیب زمین است، با استفاده از جدول استاندارد به هر پلی‌گون از نقشه کاربری اراضی یک ضریب خاص تعلق گرفت. سپس جهت امکان تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصله، نقشه فوق به رستر تبدیل شد. در مرحله آخر با ضرب این دو لایه در همدیگر، لایه تغذیه تهیه شد (شکل ۳).

لایه محیط آبخوان (A)

محیط آبخوان و مواد تشکیل‌دهنده آن تعیین‌کننده طول و روند مسیر سیستم جریان آب زیرزمینی در سفره است. بطور کلی، هر چه مواد سفره دانه‌درشت‌تر باشد، به دلیل نفوذپذیری بالاتر این مواد، پتانسیل آلودگی آبخوان نیز بیشتر خواهد شد. در مورد سفره‌های چندلایه‌ای نزدیک به سطح زمین، لایه بالاتر در نظر گرفته می‌شود و سفره‌های پایین در نظر گرفته نمی‌شوند (Voudouris et al, 2010). برای تهیه این لایه از اطلاعات ستون چاه‌ها (پیزومترها) در محدوده دشت استفاده شد. سپس یک جدول شامل اطلاعات نام چاه، موقعیت آنها برحسب UTM و جنس ستون چاه‌ها ایجاد شد و برای هر یک از پیزومترها با توجه به جنس لوگ چاه (از سطح ایستایی تا سنگ کف)

لایه تغذیه خالص سالانه (R)

تغذیه به مقدار آبی اطلاق می‌شود که از سطح زمین نفوذ می‌کند و به سطح ایستایی می‌رسد. عمل تغذیه منجر به انتقال عمودی آلودگی به سطح ایستایی و همچنین حرکت افقی آن در داخل سفره می‌شود. در گزارشات از تغذیه به عنوان عاملی در انتقال آلودگی یاد شده است و بطور کلی می‌توان عنوان کرد که با تغذیه بیشتر، پتانسیل آلودگی افزایش می‌یابد (Rahman, 2008). در مدل دراستیک فرض بر این است که عمده‌ترین حرکت عمودی آب، تغذیه ناشی از بارندگی است که از سطح زمین و به طور عمودی وارد سفره آب زیرزمینی می‌شود. در صورتیکه منابع تغذیه‌ای دیگری مانند تغذیه مصنوعی، آبیاری کشاورزی و آب فاضلاب دارای مقادیر قابل توجهی در دشت است باید در تهیه نقشه این عامل در نظر گرفته شوند (Kim and Hamm, 1999).

برای تهیه لایه تغذیه خاص سالانه دو پارامتر اصلی که شامل شبکه هم بارش و نقشه نفوذپذیری سطحی که وابسته به جنس خاک می‌باشد؛ ضروری است. لایه تغذیه خاص از ضرب لایه‌های مربوط به این دو پارامتر در هم تهیه می‌شود. با توجه به گزارشات بیلان آب دشت خاتون‌آباد، در بعضی از مناطق مقادیری از آب برگشتی کشاورزی در تهیه نقشه تغذیه دشت لحاظ گردید. در

میزان تأثیرات آن تابعی از نفوذپذیری و خصوصیات محیط وادوز است. برای تهیه این لایه همانند لایه سفره از اطلاعات ستون چاهها (پیزومترها) در محدوده دشت استفاده شد. برای این منظور، ابتدا جدولی شامل اطلاعات نام چاه، موقعیت آنها برحسب UTM و جنس ستون چاهها ایجاد گردید و سپس برای هر یک از نقاط (پیزومترها) با توجه به جنس تعیین شده توسط لوگ چاه آن نقطه یک ارزش عددی بر اساس جدول ۱ اختصاص داده شد. سپس طبق مراحل که در مورد تهیه لایه D ذکر شد نقشه نهایی سفره مطابق (شکل ۷) تهیه شد.

لایه هدایت هیدرولیکی (C)

هدایت هیدرولیکی یک سفره، گنجایش تحرک پذیری آب زیرزمینی در محیط اشباع را نشان می‌دهد. بنابراین، پتانسیل تحرک پذیری مواد آلاینده توسط آب زیرزمینی نیز تقریباً برابر هدایت هیدرولیکی سفره می‌باشد (Civita and Maio, 1995). میزان هدایت هیدرولیکی، حرکت آلاینده و پخش آن را از محل نفوذ تا رسیدن به منطقه اشباع کنترل می‌کند. به همین دلیل، مناطقی که دارای هدایت هیدرولیکی بالایی هستند، پتانسیل آلودگی بیشتری را ایجاد می‌کنند. برای ایجاد نقشه هدایت هیدرولیکی می‌توان از نقشه ضخامت لایه اشباع و قابلیت انتقال استفاده کرد. بطوریکه با تقسیم نقشه قابلیت انتقال بر ضخامت لایه اشباع، نقشه هدایت هیدرولیکی بدست می‌آید.

در هر صورت، دستیابی به تخمین دقیقی از میزان هدایت هیدرولیکی مشکل است و این مورد را می‌توان از نقاط ضعف مدل دراستیک محسوب کرد (Martines-Bastida et al., 2010). در مطالعه حاضر با توجه به اینکه نقشه هدایت هیدرولیکی دشت خاتون‌آباد در دسترس بود، تهیه این لایه مدل دراستیک با استفاده از نقشه ذکر شده و مقایسه با نقشه حاصل از درون‌یابی میزان هدایت هیدرولیکی چاه‌های پمپاژ تهیه شد. در نهایت، با رتبه‌بندی و وزن‌دهی مطابق (جدول ۱)، لایه هدایت هیدرولیکی منطقه تهیه شد (شکل ۸).

یک ارزش عددی بر اساس (جدول ۱) داده شد سپس طبق مراحل که در مورد تهیه لایه D ذکر شد نقشه نهایی سفره مطابق (شکل ۴) تهیه شد.

لایه خاک سطحی (S)

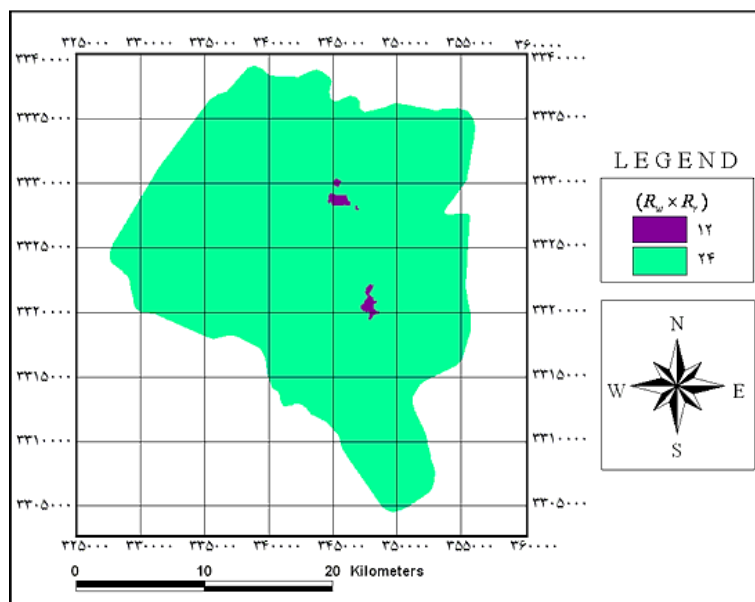
این بخش، قسمت بالایی منطقه نیمه‌اشباع (وادوز) می‌باشد که تا حد نفوذ ریشه گیاهان یا فعالیت موجودات ارگانیکی ادامه دارد. پتانسیل آلودگی خاک بستگی به خصوصیات خاک مانند بافت، نفوذپذیری و درصد مواد آلی خاک دارد (Kimura, 1997). به منظور تهیه لایه خاک از نقشه ارزیابی منابع و قابلیت اراضی منطقه استفاده گردید. مراحل تهیه لایه خاک بدین صورت می‌باشد که ابتدا نقشه ارزیابی منابع اسکن گردید و به محیط Arc View وارد شد. در مرحله بعد با ژئورفرنس این نقشه، و با توجه به نقشه کاربری اراضی، قسمت‌های مختلف بر روی یک Theme پلی‌گون‌بندی گردید. سپس با توجه به (جدول ۱) به هر پلی‌گون یک ارزش عددی اختصاص داده شد و با تبدیل نقشه فوق به رستر و ضرب آن در عدد ۲ (وزن لایه)، نقشه نهایی مطابق (شکل ۵) تهیه شد.

لایه شیب توپوگرافی (T)

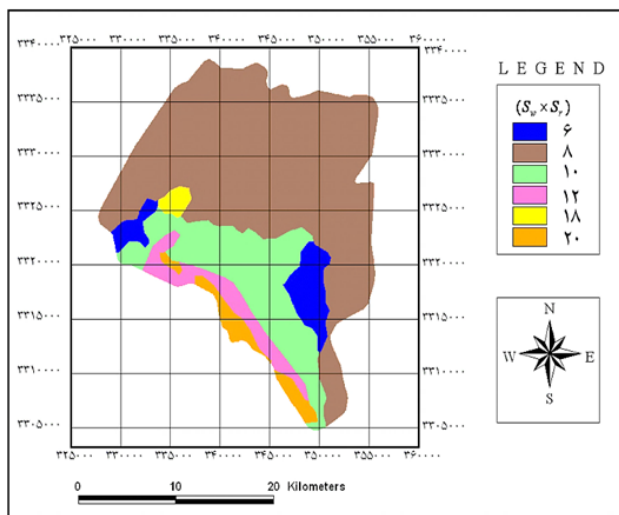
بطور کلی شیب‌های ملایم‌تر فرصت و امکان بیشتر نفوذ آلودگی‌ها همراه با بارندگی را فراهم می‌کنند و به این ترتیب، پتانسیل آلودگی بیشتری را نیز ایجاد می‌کنند. بنابراین در مدل دراستیک، نواحی با شیب کمتر رتبه بیشتری دارند. در توسعه و تکامل خاک می‌توان به نقش مهم توپوگرافی اشاره کرد بطوریکه در شیب‌های تند نسبت به شیب‌های ملایم‌تر، ضخامت لایه خاک سطحی کمتر است. بنابراین، توپوگرافی با تأثیر بر توسعه خاک نیز بر پتانسیل آلودگی تأثیر می‌گذارد. جهت تهیه لایه توپوگرافی، نقشه DEM را از نقشه توپوگرافی رقومی شده تهیه کرده و طبق (جدول ۱) رتبه‌بندی و وزن‌دهی آن صورت گرفت. (شکل ۶) لایه شیب توپوگرافی منطقه را نشان می‌دهد.

لایه محیط وادوز (I)

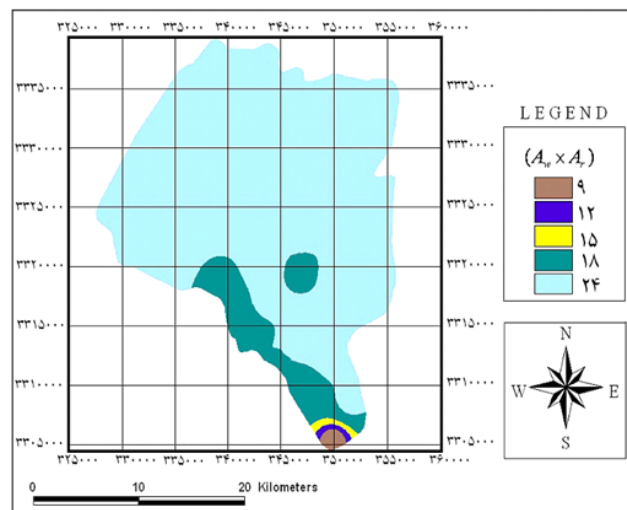
این لایه به قسمت زیرین لایه خاک سطحی تا سطح ایستایی اطلاق می‌شود. لایه وادوز مشابه لایه خاک بر روی پتانسیل آلودگی تأثیر می‌گذارد و



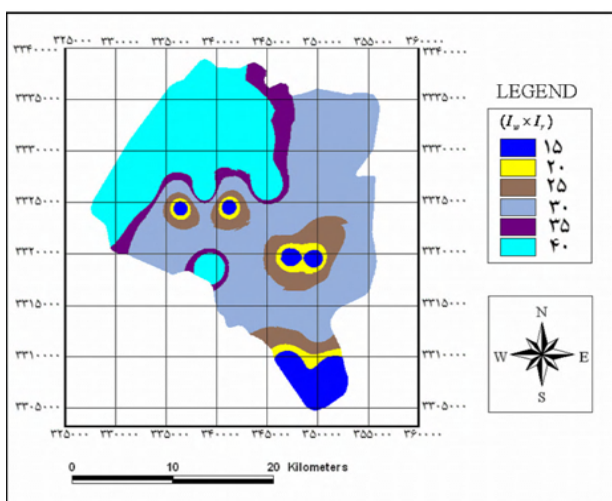
شکل ۳. نقشه رتبه‌بندی تغذیه خالص سالانه



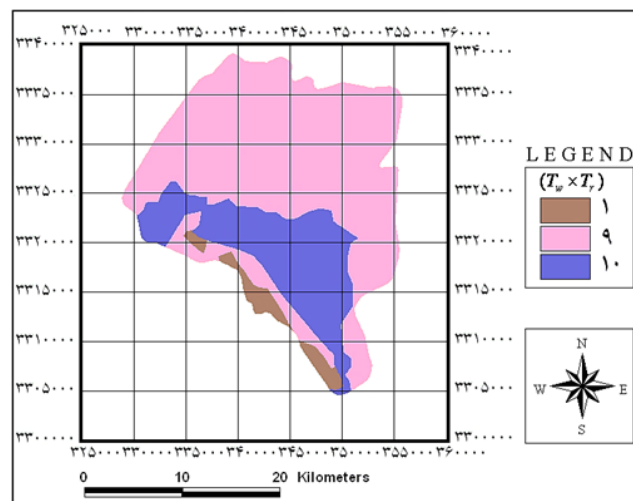
شکل ۵. نقشه رتبه‌بندی انواع خاک



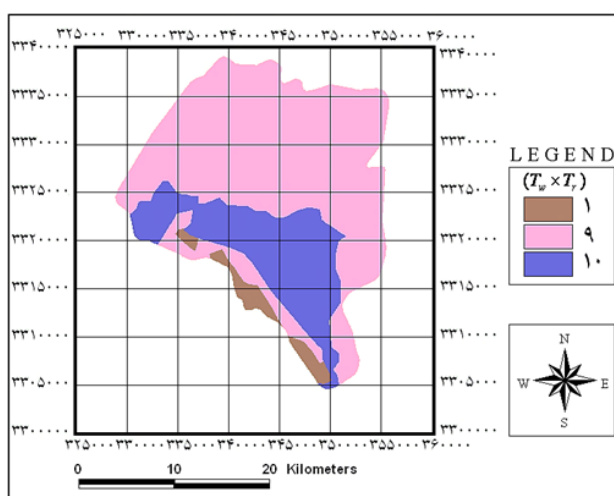
شکل ۴. نقشه رتبه‌بندی مواد تشکیل دهنده آبخوان



شکل ۷. نقشه رتبه‌بندی مواد تشکیل دهنده محیط غیراشباع



شکل ۶. نقشه رتبه‌بندی شیب توپوگرافی



شکل ۸. نقشه رتبه‌بندی شیب توپوگرافی

جدول ۱. پارامترهای دراستیک

محیط آبخوان (A)			تغذیه خالص (R)		عمق آب زیرزمینی (D)	
رتبه معمول	رتبه	جنس	رتبه	محدوده (mm/year)	رتبه	محدوده (m)
۲	۳-۱	شیل توده‌ای	۱	۵۰-۰	۱۰	۲-۰
۳	۵-۲	سنگ آذرین یا دگرگونی	۳	۱۰۰-۵۰	۹	۳-۲
۴	۵-۳	سنگ آذرین یا دگرگونی هوازده	۶	۱۷۵-۱۰۰	۷	۹-۳
۵	۶-۴	رسوبات یخچالی	۸	۲۵۰-۱۷۵	۵	۱۵-۹
۶	۹-۵	مخلوط شیل، ماسه و آهک	۹	۲۵۰<	۳	۲۳-۱۵
۶	۹-۴	ماسه سنگ توده‌ای			۲	۳۰-۲۳
۶	۹-۴	سنگ آهک			۱	۳۰<
۸	۹-۴	ماسه و گراول	وزن: ۴		وزن: ۵	
۹	۱۰-۲	بازالت				
وزن: ۳						
تأثیر محیط وادوز یا غیر اشباع (I)			شیب توپوگرافی (T)		جنس خاک (S)	
رتبه معمول	رتبه	جنس	رتبه	محدوده (%)	رتبه	جنس
۱	۱	لایه محصور	۱۰	۲-۰	۱۰	فاقد خاک
۳	۶-۲	سیلت یا رس	۹	۶-۲	۱۰	گراول
۳	۵-۲	شیل	۵	۱۲-۶	۹	ماسه
۶	۷-۲	سنگ آهک	۳	۱۸-۱۲	۸	تورب
۶	۸-۴	ماسه سنگ	۱	۱۸<	۷	رس متراکم
۶	۸-۴	تداخل شیل، ماسه و آهک	وزن: ۱		۶	لومی سنی
۶	۸-۴	ماسه، گراول، سیلت و رس			۵	لومی
۴	۸-۲	سنگ آذرین یا دگرگونی			۴	لومی سیلتی
۸	۹-۶	ماسه و گراول			۳	لومی رسی
۹	۱۰-۲	بازالت			۲	سرگین
۸	۱۰-۸	سنگ آهک کارستی	۱	رس غیرمتراکم	وزن: ۲	
وزن: ۵					هدایت هیدرولیکی (C)	
					رتبه	محدوده (m/day)
					۱	۴>
					۲	۱۲-۴
					۴	۲۸-۱۲
					۶	۴۰-۲۸
					۸	۸۰-۴۰
					۱۰	۸۰<
					وزن: ۳	

همانطور که قبلاً اشاره شد، ارزش عددی داخل هر پیکسل از حاصلضرب رتبه در وزن لایه حاصل می‌شود. در این مدل، رتبه عددی بین ۱ تا ۱۰ می‌باشد. رتبه‌بندی صورت گرفته نسبی بوده، با نظر کاربر تعیین می‌شود و مقدار عددی آن در یک لایه محدودیتی ندارد ولی دامنه کلی آن باید برای همه لایه‌ها یکسان باشد (در اینجا از ۱ تا ۱۰ محاسبه شده است). نحوه رتبه‌بندی یا امتیازدهی برای تمامی لایه‌ها باید به گونه‌ای باشد که با واقعیت فیزیکی ارتباط منطقی داشته باشد. برای مثال، در مورد لایه عمق (D)، به عمق ۲-۰ متر امتیاز ۱۰ و به عمق بیشتر از ۳۰ متر امتیاز ۱ رتبه ۱ داده می‌شود و بیانگر این است که امکان نفوذ در عمق ۲-۰ متر بیشتر از عمق بالاتر از ۳۰ متر است. در هر لایه مشخص، وزن تمامی پیکسل‌ها مقداری ثابتی است و درجه اهمیت لایه‌ها را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد. به عنوان مثال، وزن لایه نیمه‌اشباع برابر ۵ و وزن لایه توپوگرافی برابر ۱ می‌باشد که بیانگر این است که تأثیر لایه نیمه‌اشباع پنج برابر تأثیر لایه توپوگرافی است. با تلفیق لایه‌ها، شاخص دراستیک برای هر پیکسل طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Voudouris et al, 2010):

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه آسیب‌پذیری دشت خاتون‌آباد

پس از تهیه هفت لایه مورد نیاز برای استفاده از مدل دراستیک، باید روش مدل‌سازی و تلفیق این لایه‌ها را انتخاب کرد. در این تحقیق، تلفیق لایه‌ها با استفاده از منطق بولین و همپوشانی شاخص‌ها صورت گرفت. در تلفیق لایه‌ها باید نکات زیر را در نظر گرفت:

- تمامی لایه‌های ساخته شده بصورت رستر باشند.
 - اندازه پیکسل‌ها در همه لایه‌ها یکسان باشد.
 - تمامی لایه‌ها در یک سیستم مختصات مشابه تهیه شوند.
- با توجه به اینکه در این مطالعه از تصویر ماهواره‌ای استفاده شد و در این تصاویر نیز اندازه اضلاع پیکسل‌ها ۳۰ متر می‌باشد، اندازه پیکسل تمامی لایه‌ها نیز برابر ۳۰ متر در نظر گرفته شد که به این طریق بتوان مرز مورد مطالعه را بر تصویر ماهواره‌ای منطبق کرد. تلفیق لایه‌ها با جمع کردن ارزش عددی هر پیکسل با پیکسل متناظر آن در لایه‌های دیگر و توسط نرم‌افزار انجام می‌شود.

۳) ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود بیشترین وزن موثر مربوط به تغذیه خالص (R) و پس از آن هدایت هیدرولیکی (C) می‌باشد. توپوگرافی (T)، محیط خاک (S)، تاثیر ناحیه غیراشباع (I)، محیط آبخوان (A) و عمق آب زیرزمینی (D) نیز در رده‌های بعدی می‌باشد.

آنالیز حساسیت بوسیله حذف لایه‌ها

در این روش تغییرات شاخص آسیب‌پذیری بوسیله حذف یک یا چند لایه اطلاعاتی و بوسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود: $S = (V/N - V'/n) / v \times 100$ که در این رابطه، S میزان حساسیت، V و V' به ترتیب شاخص‌های آسیب‌پذیری تغییر نیافته و تغییر یافته و N و n نیز به ترتیب تعداد لایه‌های مورد استفاده برای محاسبه V و V' می‌باشد. شاخص آسیب‌پذیری تغییر نیافته در حقیقت با استفاده از هر هفت پارامتر و شاخص آسیب‌پذیری تغییر یافته با تعداد کمتری از پارامترها محاسبه می‌شود (Rahman, 2008). نتایج محاسبه این بخش از مطالعه در (جدول ۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد کمترین تغییر در نقشه پتانسیل آلودگی منطقه (۷/۸۷ درصد) زمانی حاصل می‌شود که پارامترهای S، T، I و C از مدل حذف شود. نگاه دقیق به نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که هیچگونه رابطه خاصی بین حذف پارامترها و میزان تغییر پتانسیل آلودگی وجود ندارد و همین دلیلی است بر لزوم اعمال تمامی پارامترها در مدل نهایی دراستیک این منطقه (Rahman, 2008).

صحت‌سنجی مدل

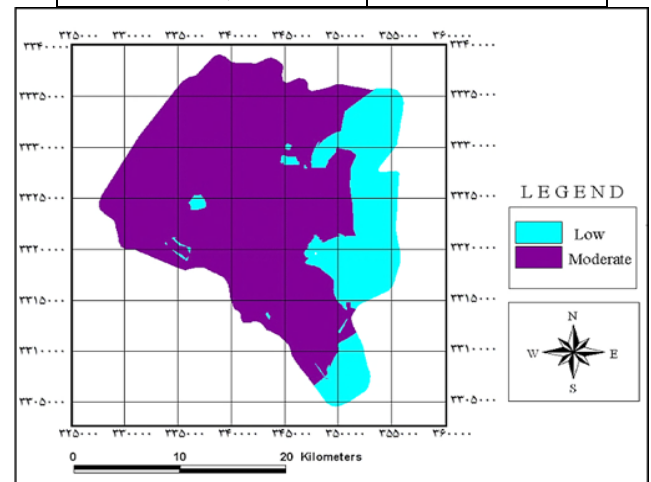
در مبحث همپوشانی لایه‌ها، از تلفیق هفت لایه وزن‌دار اطلاعاتی، شاخص دراستیک و متعاقب آن نقشه آسیب‌پذیری منطقه تهیه شد. از آنجائیکه نسبت وزن‌های در نظر گرفته شده برای لایه‌ها متفاوت است لذا، داشتن معیاری برای مقایسه و تأیید ترکیب ارائه شده ضروری است. طبق تئوری اولیه مدل دراستیک، وزن‌های موردنظر برای یون نیترات کالیبره شده است و می‌توان این کالیبراسیون را برای مناطق دیگر نیز بکار برد (Aller et al., 1987)؛ اصغری مقدم و همکاران ۱۳۸۸؛ آزادشهرکی و همکاران ۱۳۸۹؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۲). به همین دلیل، صحت‌سنجی مدل دراستیک دشت خاتون‌آباد با استفاده از یون نیترات استفاده شد. در صورتیکه غلظت یون نیترات در نقاطی با پراکندگی مناسب و برای یک دوره زمانی مشخص در دسترس باشد می‌توان مرحله صحت‌سنجی را در محدوده مورد مطالعه انجام داد. در دشت خاتون‌آباد، میزان غلظت یون نیترات از ۲۰ نقطه با پراکندگی نسبتاً مناسب در سطح منطقه اندازه‌گیری شد. (شکل ۱۰) پراکندگی نقاط ذکر شده را بر روی نقشه محلی شاخص دراستیک نشان می‌دهد. با انطباق نقاط فوق بر نقشه شاخص دراستیک مشخص گردید که هیچ یک از نقاطی که دارای نیترات بالا هستند در محدوده با استعداد آلودگی کم قرار نگرفته است که این می‌تواند دقت و صحت مدل را مورد تأیید قرار دهد (شکل ۱۱). جهت بررسی دقیق‌تر مدل، صحت‌سنجی آن از نظر آماری نیز مورد بررسی قرار گرفت. محاسبه دقت مدل از نظر آماری به این صورت انجام می‌گیرد که برای هر یک از نقاط دارای مقدار نیترات معلوم، عدد دراستیک آن نقطه را با توجه به نقشه شاخص محلی دراستیک تعیین کرده و با تقسیم غلظت نیترات بر عدد دراستیک، یک نسبت ثابت بدست می‌آید. هر چه نسبت ذکر شده در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه به هم نزدیک‌تر باشد دقت مدل بیشتر است. (جدول ۵) مقادیر عددی غلظت نیترات و عدد دراستیک برای ۲۰ نقطه در محدوده دشت را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان مشاهده کرد که مقدار Q (نسبت غلظت نیترات به عدد دراستیک) برای این ۲۰ نقطه دارای تطابق خوبی با مدل تهیه شده دارد.

$$DI = \sum_{j=1}^7 r_j w_j = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

در رابطه بالا، حروف بزرگ نشان‌دهنده نام لایه، اندیس W وزن لایه و اندیس r رتبه لایه می‌باشد. شاخص دراستیک به عنوان بخشی از مطالعات هیدروژئولوژیکی می‌تواند در مقیاس محلی و یا زمانیکه اطلاعات زیادی از منطقه مورد مطالعه در دسترس باشد، بسیار دقیق محاسبه شود (Voudouris et al, 2010). بطور کلی، شاخص دراستیک دارای عددی بین ۲۳ تا ۲۳۰ می‌باشد. با توجه به رابطه بالا، شاخص دراستیک برای دشت خاتون‌آباد بین ۹۱ تا ۱۵۵ محاسبه گردید. در نهایت، با رتبه‌بندی شاخص دراستیک طبق (جدول ۲) نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه حاصل شد. (شکل ۹) نقشه آسیب‌پذیری دشت خاتون‌آباد را نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل مشخص است استعداد آلودگی دشت خاتون‌آباد در محدوده کم تا متوسط قرار می‌گیرد.

جدول ۲. رتبه‌بندی شاخص دراستیک

رتبه	شاخص دراستیک
بدون ریسک	۲۳-۷۱
آسیب‌پذیری کم	۷۲-۱۲۱
آسیب‌پذیری متوسط	۱۲۲-۱۷۰
آسیب‌پذیری زیاد	۱۷۱-۲۳۰



شکل ۹. نقشه آسیب‌پذیری دشت خاتون‌آباد بر اساس شاخص دراستیک

آنالیز حساسیت مدل دراستیک

آنالیز حساسیت یک گام اساسی و ضروری در ارزیابی مدل دراستیک می‌باشد. در این مرحله پارامترهای ورودی مدل تغییر داده شده و عکس‌العمل سیستم نسبت به این تغییرات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت میزان حساسیت هر پارامتر مشخص می‌شود. تا کنون دو روش کلی برای آنالیز حساسیت شاخص دراستیک ارائه شده است که شامل آنالیز حساسیت پارامتر واحد و آنالیز حساسیت بوسیله حذف لایه‌ها می‌باشد. در این مطالعه آنالیز حساسیت پارامتر واحد و آنالیز حساسیت بوسیله حذف لایه‌ها برای مدل دراستیک دشت خاتون‌آباد انجام شد.

آنالیز حساسیت پارامتر واحد

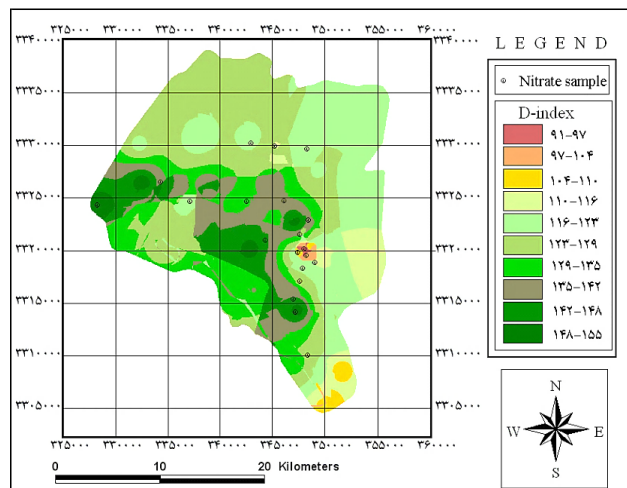
در این روش وزن واقعی یا موثر هر پارامتر با استفاده از رابطه زیر بدست آمده و با وزن نظری مقایسه می‌شود: $W = (P_r P_w / V) \times 100$ که در این رابطه، W وزن موثر هر یک از پارامترها، P_r و P_w نیز به ترتیب وزن و نرخ مربوط به آن پارامتر و V نیز شاخص آسیب‌پذیری کل در آن زیر ناحیه است (Rahman, 2008). نتایج محاسبه وزن واقعی پارامترهای ۷ گانه در (جدول

جدول ۳. آنالیز حساسیت پارامتر واحد

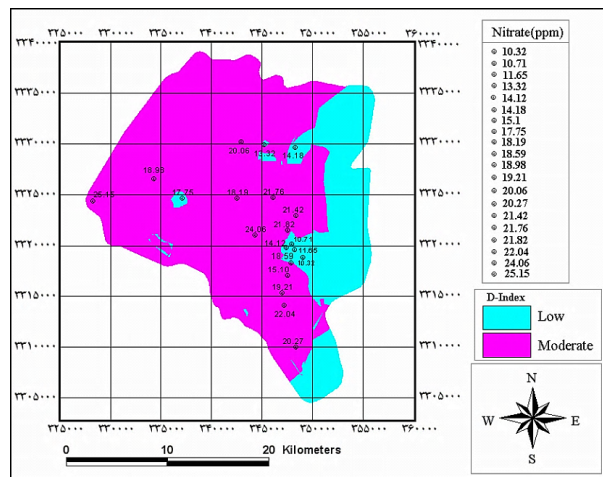
پارامتر	وزن نظری	وزن نظری (درصد)	وزن موثر (درصد)		انحراف معیار
			حداقل	حداکثر	
D	۵	۲۱/۷۳	۷/۴۰	۲۵/۹۲	۱۲/۹۶
R	۴	۱۷/۳۹	۳۳/۳۳	۶۶/۶۶	۵۰
A	۳	۱۳/۰۴	۰/۳۰	۲۳/۰۷	۱۳/۲۷
S	۲	۸/۶۹	۸/۱۰	۲۷/۰۲	۱۶/۸۹
T	۱	۴/۳۴	۵	۵۰	۳۱
I	۵	۲۱/۷۳	۹/۰۹	۲۴/۲۴	۱۶/۶۶
C	۳	۱۳/۰۴	۹/۰۹	۵۴/۵۴	۳۲/۷۲

جدول ۴. آمار بدست آمده از حذف لایه‌های اطلاعاتی

پارامترهای استفاده شده	شاخص تغییر (درصد)	انحراف معیار	
		حداقل	حداکثر
D, R, S, T, I, C	۲/۳۸	۱۲/۶۲	۱۰/۰۳
D, R, S, T, C	۴/۲۹	۱۲/۲۹	۹/۶۶
D, R, T, C	۱/۷۹	۱۱/۷۹	۸/۹۴
D, R, T	۲/۳۸	۱۹/۰۵	۸/۲۷
D, R	۱/۷۹	۳۵/۷۱	۷/۸۷
R	۰	۸۵/۷۱	۱۵/۰۷



شکل ۱۰. پراکندگی نقاط با غلظت معلوم بر روی نقشه محلی شاخص دراستیک



شکل ۱۱. پراکندگی نقاط با غلظت معلوم بر روی نقشه آسیب پذیری منطقه

جدول ۵. مقادیر غلظت نیترات و شاخص دراستیک برای ۲۰ نقطه در محدوده دشت

$Q = \frac{\text{Nitrate}}{D - \text{Index}}$	شاخص دراستیک	غلظت نیترات (ppm)	مختصات محل نمونه برداری (UTM)
۰/۱۳	۱۳۸	۱۸/۹۸	3326553N-334350E
۰/۱۱	۱۲۶	۱۵/۱	3316790N-347414E
۰/۱۴	۱۱۹	۱۷/۷۵	3320210N-345730E
۰/۱۱	۱۰۰	۱۱/۶۵	3320084N-348370E
۰/۱۱	۱۱۹	۱۴/۱۸	3330051N-345287E
۰/۱۱	۱۱۳	۱۳/۳۲	3330169N-344305E
۰/۱۷	۱۱۹	۲۰/۰۶	3330208N-343047E
۰/۱۵	۱۳۸	۲۱/۴۲	3322982N-348484E
۰/۱۶	۱۳۲	۲۱/۸۲	3321574N-347659E
۰/۱۶	۱۴۵	۲۴/۰۶	3320648N-344401E
۰/۱۴	۱۵۱	۲۲/۰۴	3313889N-346613E
۰/۱۵	۱۳۸	۲۱/۷۶	3325503N-346772E
۰/۱۶	۱۲۶	۲۰/۲۷	3310026N-348462E
۰/۱۶	۱۵۱	۲۵/۱۵	3323150N-350000E
۰/۱۳	۱۰۷	۱۴/۱۲	3319831N-347376E
۰/۱۱	۹۴	۱۰/۷۱	3320042N-348130E
۰/۱۰	۱۱۳	۱۰/۳۲	3318896N-349125E
۰/۱۵	۱۱۹	۱۸/۵۹	3318353N-347979E
۰/۱۳	۱۴۵	۱۹/۲۱	3315094N-347104E
۰/۱۳	۱۳۲	۱۸/۱۹	3324725N-342604E

نتایج

شاخص دراستیک آبخوان دشت خاتون آباد نشان می‌دهد که این آبخوان از نظر طبقه‌بندی استعداد آلودگی در محدوده کم تا متوسط قرار می‌گیرد. از نظر وسعت نیز حدود ۳۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در محدوده آسیب‌پذیری کم و ۷۰ درصد باقیمانده در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار می‌گیرد. محدوده آسیب‌پذیری کم در قسمت‌های شمال شرقی، شرق و بخصوص جنوب محدوده مورد مطالعه واقع شده است. در این مناطق به دلیل حمل مواد ریزدانه توسط سیلاب‌ها، لایه‌های خاک دارای تناوب‌هایی از مواد دانه ریز می‌باشد. محدوده آسیب‌پذیری متوسط قسمت‌های وسیعی از شمال غربی، غرب و مرکز را در بر می‌گیرد که این نواحی برای جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی منطقه باید تحت مراقبت و کنترل بیشتری قرار گیرد. با توجه به اینکه می‌توان تغذیه آبخوان را از سمت شمال و تا حدودی شمال غرب منطقه متصور شد، در صورتیکه آلودگی وارد این بخش از دشت شود احتمال انتقال آن به پایین دست و آلودگی کل آبخوان وجود خواهد داشت. از طرفی با توجه به اینکه کارخانه ذوب مس خاتون آباد و کارخانه مولیبدن در این مناطق واقع شده‌اند، بررسی ویژه و توجه به مسائل زیست محیطی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد.

انتطابق غلظت نیترات بر روی نقشه نهایی دراستیک نشان داد که کلیه نقاطی که دارای نیترات بالا هستند در محدوده با پتانسیل آلودگی زیاد قرار گرفته و این دلیلی بر دقت و صحت مدل دراستیک تهیه شده برای دشت خاتون آباد می‌باشد. بنابراین می‌توان مدل تهیه شده را در ارزیابی‌های زیست محیطی و تحلیل آلودگی‌های مختلف مورد استفاده قرار داده و مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی قرار گیرد.

پیشنهادات

با توجه به ماهیت صنعتی-کشاورزی دشت خاتون آباد، بطور کلی می‌توان عنوان کرد که بر اساس نقشه‌های تهیه شده از مناطق مستعد آلودگی در سطح محدوده مورد مطالعه می‌توان سیستمی را مورد توجه و مطالعه قرار داد که در آن از فاکتورهای متعددی مانند نوع آبیاری، نوع محصول کشاورزی، نوع کود شیمیایی استفاده شده در سطح مناطق کشاورزی و میزان مصرف آب استفاده می‌شود و به این ترتیب یک ابزار جامع و کامل را جهت تعریف مناسب کاربری در منطقه و تعیین مناطق دارای حساسیت بالای تغییرات کیفی آماده کرد (Manos et al., 2009 and 2010). با توجه به اینکه کارخانجات ذوب خاتون آباد در منطقه مورد مطالعه واقع گردیده و این منطقه فاقد سیستم فاضلاب است، نیاز به طراحی یک سیستم فاضلاب در این منطقه احساس می‌شود. پساب‌های تولیدی به مناطقی که حساسیت کمتری نسبت به آلودگی دارند منتقل شوند. احداث واحدهای جدید صنعتی در مناطق دارای استعداد آلودگی کمتر صورت گیرد. با توجه به اینکه یکی از منابع اصلی نیترات در آب زیرزمینی در اثر بکارگیری نادرست کودهای شیمیایی در فعالیتهای کشاورزی است، اصلاح نحوه و میزان مصرف کودهای نیتراژ ضروری است. از دفع مواد آلاینده (خصوصاً مواد زائد کارخانجات ذوب مس) در مناطقی با حساسیت آسیب‌پذیری بالا خودداری شود. صحت‌سنجی مدل توسط داده‌هایی حاصل از تعداد نمونه بیشتر و پراکندگی کمتر به انجام رسد. مونیتورینگ دقیق و مداوم مقدار نیترات در سطح دشت انجام شود که به این طریق بتوان مدل را با داده‌های دقیق‌تر و بیشتری، تهیه و کالیبره کرد.

منابع

- احمدی، ج.، آخوندی، ل.، عباسی، ه.، خاشعی سیوکی، ع.، علیمددی، م.، ۱۳۹۲، تعیین آسیب پذیری آبخوان با استفاده از مدل دراستیک و اعمال آنالیز حساسیت تک پارامتری و حذفی (مطالعه موردی: دشت سلفچگان-نی زار). مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۰، شماره ۳، صفحه ۱-۲۵
- آزادشهرکی، ف.، آغاسی، ع.، آزادشهرکی، ف.، زارعی، ع.، ۱۳۸۹، ارزیابی پتانسیل و آنالیز حساسیت آسیب پذیری آب زیرزمینی دشت هشتگرد به روش دراستیک. مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۱، شماره ۷۴، صفحه ۶۱-۷۰
- اصغری مقدم، ا.، فیجانی، ا.، ندیری، ع.، ۱۳۸۸، ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی دشت های بازرگان و پلدشت با استفاده از مدل دراستیک بر اساس GIS. مجله محیط شناسی، شماره ۵۲، صفحه ۵۵-۶۴
- چیت سازان، م.، اختری، ی.، ۱۳۸۵، پتانسیل یابی آلودگی آب های زیرزمینی در دشت های زویرچری و خران با استفاده از مدل دراستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله آب و فاضلاب، جلد ۱۷، شماره ۳، صفحه ۳۹-۵۱
- Adamat. R., Foster. I., Baban. S., 2003, Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Arzaq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography*, 23:303-324
- Aller. L., Bennett. T., Lehr. J., Petty. R., Hackett. G., 1987, DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Ada, Oklahoma: U.S. and Environmental Protection Agency
- Almasri. M., 2008, Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer. Palestine. *Journal of Environmental Management*, 88: 577-593
- Boughriba. M., Barkaoui. A., Zarhloule. Y., Lahmer. Z., El-Houadi. B., Verdoya. M., 2009, Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Arabian Journal of Geoscience*. 3:207-220
- Civita. M.V., De Maio. M., 1998, Mapping groundwater vulnerability in areas impacted by flash food disasters. 13th ESRI European user conference, France, Italy 7-9 October
- Kim. Y.J., Hamm. S.Y., 1999, Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique. Cheongju area, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 17(2): 227-235
- Manos. B., Bournaris. Th., Papathanasiou. J., Voudouris. K., 2009, A DSS for sustainable development and environmental protection of agricultural regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 164(1): 43-52
- Manos. B., Papathanasiou. J., Bournaris. Th., Voudouris. K., 2010, A multicriteria model for planning agricultural regions within a context of groundwater rational management. *Journal of Environmental Management*, 91: 1593-1600
- Martinez-Bastida. J.J., Arauzp. M., Valladolid. M., 2010, Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*, 18:681-698
- Rahman. A., 2008, A GIS Based DRASTIC model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, 28: 32-53
- Samey. A.A., Gang. C., 2008, A GIS Based DRASTIC Model for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in West Mitidja: Blida City. Algeria. *Research Journal of Applied Sciences*, 3(7):500-507
- Tilahun. K., Merkel. B.J., 2010, Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. *Environmental Earth Sciences*, 59:1485-1496
- Voudouris. K., Nazakis. N., Polemio. M., Kareklas. K., 2010, Assessment of intrinsic vulnerability using the DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer, Cyprus, *European Water*, 30:13-24
- Yang. Y.S., Wang. L., 2007, GIS-based dynamic risk assessment for groundwater nitrate pollution from agricultural diffuse sources. *Journal of Jilin University*, 37(2):311-318.