

تحلیل میزان عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل دراستیک استاندارد در مقایسه با وجود آلاینده یون نیترات (منطقه مطالعاتی دشت الشتر - لرستان)

ناصر گنجی خرم‌دل^{۱*}، معصومه شمس^۲ و امیر پورحقی^۳

چکیده

ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان برای توسعه و مدیریت منابع آب زیرزمینی، تصمیم‌های کاربری زمین و نحوه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب خصوصاً بهره‌برداری و حفاظت کیفی آب زیرزمینی بسیار مفید و پراهمیت است. در این تحقیق، هفت لایه از پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل استاندارد دراستیک (DRASTIC) تهیه شد. سپس، میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترهای مدل بر وضعیت آبخوان بررسی و بعد از به‌کارگیری وزن پارامترهای مدل دراستیک، نقشه هم‌پوشانی هفت لایه تشکیل‌دهنده مدل که نقشه پهنه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری مدل دراستیک بود، تهیه گردید. بر اساس این طبقه‌بندی ۳/۴، ۴۲/۲، ۴۱/۴، ۲۴ و ۷ درصد آبخوان به ترتیب دارای میزان آسیب‌پذیری قابل اغماض، خیلی کم، کم، متوسط و متوسط تا زیاد بودند. به‌منظور اعتبارسنجی مدل، از مقادیر آلاینده نیترات موجود در آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه استفاده شد که بر اساس نتایج حاصل، میزان ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۶۷ محاسبه شد. با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، از روش تحلیل حساسیت تک پارامتری استفاده شد که بر اساس آن، مقدار ضریب همبستگی پیرسون برای پارامتر عمق سطح ایستابی، بالاترین و برای پارامترهای تغذیه خالص و محیط خاک کمترین بود. به دلیل تطابق نداشتن وزن پارامترهای اختصاص یافته به پارامترها در مدل با نتایج تحلیل حساسیت از روش رتبه‌بندی AHP استفاده شد. مدل اصلاح‌شده (DATIC)، منطقه را به سه دسته مختلف آسیب‌پذیری تقسیم‌بندی کرد. بر اساس نتایج حاصل، مقدار ضریب همبستگی پیرسون در مدل اصلاح‌شده از ۶۷ به ۷۹ درصد ارتقا یافت که می‌تواند تأییدی بر تعریف مدل اصلاح‌شده دراستیک در منطقه مورد مطالعه باشد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، پارامترهای هیدروژئولوژیکی، پتانسیل آسیب‌پذیری، کاربری اراضی، مواد آلاینده.

ارجاع: گنجی خرم‌دل ن. شمس م. و پورحقی ا. ۱۳۹۷. تحلیل میزان عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل دراستیک استاندارد در مقایسه با وجود آلاینده یون نیترات (منطقه مطالعاتی دشت الشتر - لرستان). مجله پژوهش آب ایران. ۳۱: ۳۵-۵۰.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

۳- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکده آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: n-ganjikhorrandel@araku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۰

مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی، از مهم‌ترین منابع آبی هر کشور به حساب می‌آیند. در بسیاری از موارد، آلودگی آب‌های زیرزمینی پس از آلودگی چاه‌های آب شرب مشخص می‌شود و رفع آلودگی آنها بسیار پرهزینه و فرایندی طولانی است و اغلب زمانی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آبخوان تقریباً غیرممکن است (خدایی و همکاران، ۱۳۸۵). یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و مدیریت کاربری اراضی است. مفهوم آسیب‌پذیری آب زیرزمینی برای اولین بار توسط مارگات در فرانسه در سال ۱۹۶۸ مورد استفاده قرار گرفت (بمانی و همکاران، ۱۳۸۸). ایشان آسیب‌پذیری آبخوان را سهولت امکان نفوذ و پخش آلودگی از سطح زمین به سفره آب زیرزمینی در شرایط طبیعی تعریف کرد. روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای تخمین میزان آسیب‌پذیری آبخوان در جهان توسعه پیدا کرده است که از جمله رایج‌ترین آنها می‌توان به مدل‌های GOD (فوستر، ۱۹۸۷)، AVI (استمپروت و همکاران، ۱۹۹۳)، DRASTIC (آلر و همکاران، ۱۹۸۷)، SINTACS (سیویتا، ۱۹۹۴)، IRISH (دالی و درو، ۱۹۹۹)، SI (ریبیرو، ۲۰۰۰) اشاره کرد. از این میان پرکاربردترین مدل، مدل دراستیک است که در سراسر جهان مطالعات زیادی جهت ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از این مدل صورت گرفته است. نتایج حاصل شده از به‌کارگیری مدل و مطابقت آن با اطلاعات میدانی، صحت و قابلیت اطمینان‌پذیری بسیار مناسب مدل دراستیک را نسبت به دیگر مدل‌ها نشان داده است. از آن میان می‌توان به دو تحقیق جدید که تأییدی بر نتایج حاصل از مطالعات قبلی بود، اشاره کرد. لاسامانی و همکاران (۲۰۱۵) در دشت میسور هند به بررسی میزان آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداختند. هدف اصلی تحقیق، تعیین مناطق مستعد آلودگی آب‌های زیرزمینی در این منطقه بود که نتایج بسیار مناسب ارزیابی گردید. در مطالعه مشابهی، ویکتورین و همکاران (۲۰۱۵) نیز به ارزیابی میزان آسیب‌پذیری بودن آبخوان دشت دوالای کامرون به مواد آلاینده به‌کمک مدل دراستیک و با استفاده از نرم‌افزار GIS پرداختند. در ادامه مطالعات صورت‌گرفته، برخی از محققین به این نکته پی بردند که کمتر در

استفاده از مدل دراستیک به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه توجه شده است و بیان نمودند که به نظر می‌رسد که بهتر است مدل مذکور با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی هر منطقه اصلاح گردد. ژیانوسی سو و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به آلودگی مواد آلی در حوضه رودخانه هون در شمال شرقی چین، از مدل دراستیک و نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی بهره گرفتند. در این تحقیق، برای کاهش تأثیر نظر کارشناسی روی وزن پارامترهای استفاده‌شده در مدل مذکور، اصلاحاتی صورت گرفت و بر طبق نتایج حاصل شده، منطقه برحسب میزان آسیب‌پذیر بودن به مواد آلاینده دسته‌بندی و مدل اصلاح شده و جدید DRAOTIC معرفی شد. این مدل جدید نسبت به مدل عمومی دراستیک مزیتی داشت که وقتی پارامتر مواد آلی، جایگزین پارامتر محیط خاک شد، مدل با دقت بیشتری، آلودگی ناشی از مواد آلی در آب‌های زیرزمینی و میزان پتانسیل آسیب‌پذیری حوضه رودخانه هون را نشان داد. یون نیترا، آلاینده مهمی است که عمدتاً بر اثر فعالیت‌های کشاورزی به آبخوان وارد می‌شود و آثار مخربی بر محیط‌زیست و همچنین سلامت انسان دارد که به همین منظور در مدیریت منابع آب اروپا برای به حداقل رساندن این خطر اقدامات خاصی در نظر گرفته شده است (چیکالمو، ۲۰۱۴). افروزی و محمدزاده (۱۳۹۲) در تحقیقی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بروجن-فرادنبه را با استفاده از مدل دراستیک بررسی و نتایج را با پراکندگی مقدار یون نیترا در منطقه ارزیابی کردند. در این تحقیق، به اصلاح رتبه‌ها و وزن‌های داده شده به پارامترهای مختلف مدل بر اساس اطلاعات حاصل از ۱۲ چاه پرداخته شد. پس از تهیه مدل دراستیک اصلاح شده، معلوم گردید که ضریب همبستگی پیرسون بین غلظت نیترا آب چاه‌ها و شاخص آسیب‌پذیری، از مقدار ۴۷ به ۸۰ درصد افزایش نشان داده و در نهایت، نتیجه‌گیری شد که مدل دراستیک اصلاح شده از مدل دراستیک استاندارد بسیار مؤثرتر عمل کرده است. تبرمایه و همکاران (۱۳۹۲) هم به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آزاد دشت تبریز با استفاده از مدل دراستیک و تحلیل حساسیت آن به روش حذف پارامتر و همچنین تحلیل تک پارامتری پرداختند که طی نتایج به‌دست آمده مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر، عمق سطح ایستابی معرفی گردید. همچنین، با

۲۰ چاه مشاهده‌ای که مشخصات آنها در جدول ۱ آورده شده است، استفاده شد.

مدل دراستیک

مدل دراستیک توسط آلر و همکاران در سال ۱۹۸۷ در آمریکا و به منظور حفاظت از منابع آب زیرزمینی توسعه پیدا کرد. مدل مذکور، مدلی تجربی است که آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی نسبت به آلودگی را بر اساس وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه برآورد می‌نماید. واژه دراستیک، از هفت پارامتر عمق تا سطح ایستابی^۱، تغذیه خالص^۲، محیط آبخوان^۳، محیط خاک^۴، توپوگرافی^۵، تأثیر ناحیه غیراشباع^۶ و هدایت هیدرولیکی^۷ تشکیل شده است (بایکر و همکاران، ۲۰۰۵). به هر پارامتر براساس میزان عدم قطعیت و حساسیت نسبی در برابر آلاینده، یک وزن نسبی از ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. همچنین، رتبه‌بندی بر اساس مقیاس ۱ تا ۱۰ و اهمیت نسبی آن و تأثیر آن در پتانسیل آلودگی در منطقه مورد ارزیابی، انجام می‌شود (آلر و همکاران ۱۹۸۷). شاخص دراستیک از طریق جمع فاکتورهای وزنی هر بخش از منطقه محاسبه می‌شود که به صورت معادله (۱) نمایش داده می‌شود که در آن t رتبه و w وزن هر پارامتر است. معمولاً بالاتر بودن رقم شاخص دراستیک (DI)، آسیب‌پذیری بیشتری را نسبت به آلودگی آب زیرزمینی نشان می‌دهد.

DRASTIC Index = (۱)

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

عمق سطح ایستابی، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای شاخص دراستیک است (امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۲). افزایش این ضخامت منجر به تصفیه و حذف آلودگی توسط منطقه غیراشباع خاک می‌شود (آزاد شهرکی و همکاران، ۱۳۸۹). برای تهیه این لایه از داده‌های جمع‌آوری شده عمق تا سطح ایستابی، تعداد ۲۰ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت الشتر استفاده و با درون‌یابی این نقاط و با توجه به معیارهای مدل دراستیک ارزش‌گذاری شد (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). در این تحقیق، نقشه‌های شیب، بارندگی و نفوذپذیری دشت الشتر بر اساس معیارهای

هم‌پوشانی نقش کاربری اراضی و نقش آسیب‌پذیری دراستیک، مناطقی که از نظر پتانسیل میزان آلودگی و خطر آسیب‌پذیری ناشی از فعالیت‌های کشاورزی شاخص و گویای مطلب بودند، مشخص شدند. در ادامه این تحقیق، نقشه پراکندگی مقادیر یون نترات با مدل سینتکس نیز که یکی از مدل‌های شناخته شده دیگر در ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی است، کنترل گردید که نتایج حاصل، یافته‌های قبلی را تأیید می‌کرد. مطالب بالا، گوشه‌ای از تحقیقات بسیار مناسب و ادامه‌داری بوده است که در جهان و کشور انجام شده است. همان‌طور که بیان گردید، توجه و اهمیت به حفظ محیط‌زیست و سلامتی انسان و در نهایت پاک‌ماندن سفره‌های آب زیرزمینی که عمدتاً به منظور شرب از آن استفاده می‌گردد، در هر منطقه با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی هر منطقه لازم و ضروری است. به همین منظور، هدف از این مطالعه، بررسی میزان عدم قطعیت هر یک از پارامترهای مؤثر در مدل دراستیک با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه و نظرهای کارشناسی می‌باشد تا در نهایت، مدل اصلاح‌شده و منطبق با شرایط منطقه مطالعاتی پیشنهاد گردد. در ضمن، به منظور اعتبارسنجی مناطق مستعد و آسیب‌پذیر، نقشه پراکندگی آلاینده نترات نیز تهیه و با نقشه به‌دست آمده از مدل پیشنهادی مقایسه می‌شود تا دقت و صحت نتایج بهتر مورد ارزیابی و قضاوت قرار گیرد. منطقه مطالعاتی این تحقیق، دشت الشتر در استان لرستان می‌باشد که از نظر کشاورزی مهم است و بنابراین، تحقیقات مذکور لازم و ضروری می‌باشند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت الشتر در بخش مرکزی شهرستان سلسله از استان لرستان واقع شده است که بین طول‌های ۰۲-۴۸ تا ۳۱-۴۸ شرقی و عرض‌های ۴۳-۳۳ تا ۰۵-۳۴ شمالی واقع شده است. از نظر تقسیمات هیدروژئولوژیکی، محدوده مطالعاتی دشت الشتر، (شکل ۱) شامل حوضه رودخانه آب الشتر تا محل الحاق به رودخانه هررود است. رودخانه الشتر، یکی از شاخه‌های اولیه تشکیل‌دهنده رودخانه کشکان است که از شاخه‌های مهم رودخانه کرخه است (بهاروند و همکاران، ۱۳۹۲). در این تحقیق از اطلاعات

1- Depth to water table
2- Net recharge
3- Aquifer media
4- Soil media
5- Topography
6- Impact of vadose zone
7- Hydraulic conductivity

زیرزمینی را تحت یک شیب هیدرولیکی معین کنترل می‌کند. برای تهیه این لایه با تقسیم نقشه ضریب قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت آبخوان، نقشه هدایت هیدرولیکی دشت به دست می‌آید و در نهایت، نقشه هدایت هیدرولیکی با توجه به نحوه طبقه‌بندی این پارامتر در محاسبه شاخص دراستیک، طبقه‌بندی می‌گردد (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). در این تحقیق، از نقشه قابلیت انتقال به صورت خطوط هم‌قابلیت و همچنین نقشه ضخامت آبخوان به صورت نقشه هم‌ضخامت از مطالعات قبلی موجود در منطقه استفاده شد. برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شده پارامترها از داده‌های ورودی و به‌کارگیری ضرایب و رتبه‌های آنها از سامانه اطلاعات جغرافیایی بهره گرفته شده است.

آلاینده آب‌های زیرزمینی

نیترا و فسفات دو آلاینده عمده آب‌های زیرزمینی هستند که منابع اصلی آنها فاضلاب‌های شهری و فعالیت‌های کشاورزی می‌باشند. به سبب قابلیت تحرک کمتر فسفات، آلودگی وسیع آب‌های زیرزمینی نسبت به فسفات، کمتر گزارش شده است؛ در حالی که نیترا به‌عنوان شاخص آلودگی آب‌های زیرزمینی همواره مورد توجه محققان بوده است و در این تحقیق نیز به‌منظور اعتبارسنجی مناطق مستعد آسیب‌پذیری، نتایج با نقشه‌های پراکندگی یون نیترا مقایسه می‌شود.

تحلیل حساسیت تک پارامتری

میزان حساسیت تک‌پارامتری برای ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترهای مدل روی شاخص آسیب‌پذیری است. در این روش تحلیل، وزن "مؤثر" یا "واقعی" هر پارامتر با وزن "تئوریک" اختصاص‌یافته از طریق مدل تحلیلی مقایسه می‌شود. وزن مؤثر هر پلیگون با استفاده از معادله (۲) به دست می‌آید:

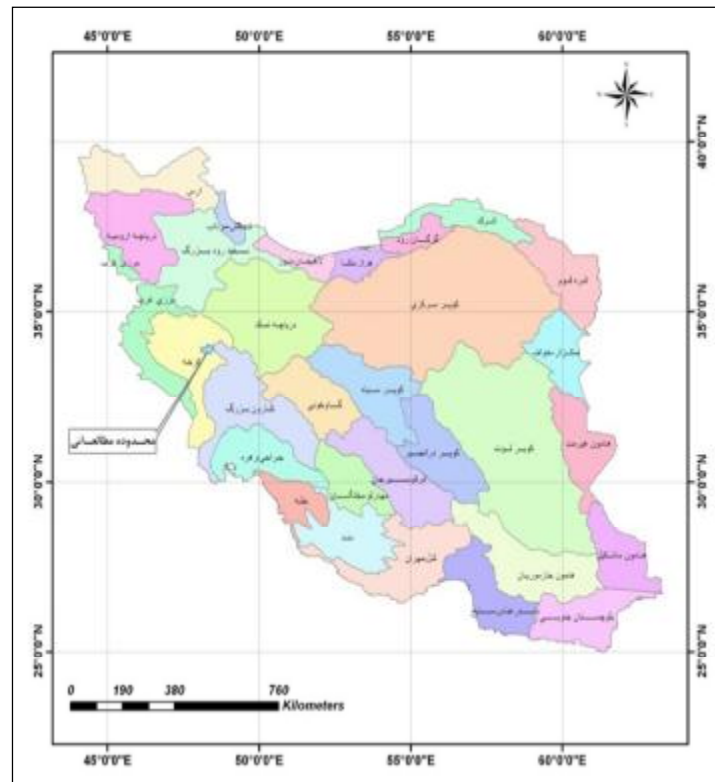
$$W = \left(\frac{PrPw}{V} \right) \times 100 \quad (2)$$

در این معادله، W ، وزن مؤثر هر پارامتر، P_r و P_w ، به ترتیب مقدار رتبه و وزن پارامتر و V ، شاخص کلی آسیب‌پذیری است (بایبکر و همکاران، ۲۰۰۵).

پیسکوپو (۲۰۰۱) طبقه‌بندی شد و بعد از هم‌پوشانی آنها لایه تغذیه خالص به دست آمد. در این روش، با استفاده از مجموع شیب، میزان بارندگی و میزان نفوذپذیری خاک منطقه، پتانسیل تغذیه منطقه به دست آمد. بارندگی بر اساس اطلاعات هواشناسی منطقه و به‌صورت متوسط آمار پنج ساله از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ استخراج شد. نفوذپذیری نیز از مطالعات قبلی خاک‌شناسی در منطقه استفاده شد. لایه محیط خاک، قسمت بالایی و هوازده ناحیه غیراشباع می‌باشد. برای تهیه لایه مربوط به این پارامتر از لاگ ۲۰ عدد از چاه‌های بهره‌برداری موجود در دشت الستر استفاده شد و سپس، بر اساس معیارهای مدل دراستیک به هر کدام از چاه‌ها رتبه‌ای اختصاص داده شد (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). خصوصیات خاک، میزان نفوذ تغذیه به داخل آبخوان، میزان انتشار آلاینده‌ها و فرایند پاک‌سازی^۱ آلاینده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌منظور تهیه لایه محیط خاک، پس از شناسایی تیپ‌های مختلف خاک در منطقه موردنظر، لایه خاک منطقه استخراج و به‌صورت یک لایه رستری ذخیره می‌گردد. سپس، با توجه به نتایج آلر و همکاران (۱۹۸۷) طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری می‌شود. لایه توپوگرافی به شیب زمین اطلاق می‌گردد و به‌صورت درصد شیب بیان می‌شود. مناطق کم‌شیب تمایل به نگهداری طولانی‌تر آب دارند و این، فرصت نفوذ هرچه بیشتر آب تغذیه‌ای و پتانسیل بیشتر حرکت آلاینده را موجب می‌شود. برای تهیه نقشه توپوگرافی و شیب منطقه، از نقشه مدل رقومی ارتفاعی ۱/۲۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. سپس نقشه شیب به‌دست آمده بر اساس معیارهای آلر و همکاران (۱۹۸۷) رتبه‌بندی می‌شود. ناحیه غیراشباع به بخش بالای سطح ایستابی گفته می‌شود که غیراشباع بوده و یا به‌طور ناپیوسته اشباع می‌باشد و بین لایه خاک و سطح ایستابی واقع است. در صورتی که ناحیه غیراشباع نفوذپذیری بالایی داشته باشد، رتبه آسیب‌پذیری بالایی به آن اختصاص می‌یابد. برای تهیه این لایه با توجه به ۲۰ عدد از لاگ چاه‌های دشت، به هر کدام از چاه‌ها با توجه معیارهای آلر و همکاران (۱۹۸۷) رتبه‌ای اختصاص داده و سرانجام لایه رستری تهیه می‌شود. توانایی مواد آبخوان در انتقال آب، هدایت هیدرولیکی گفته می‌شود که نرخ جریان آب‌های

جدول ۱- عمق سطح ایستابی چاه‌های دشت الشتر و مختصات آنها

ایستگاه	X	y	عمق سطح ایستابی (m)
اصلاشاه	۲۳۶۲۱۲	۳۷۵۳۷۱۱	۳۹/۸۶
بتکی	۲۴۰۰۱۲	۳۷۵۲۸۹۶	۱۱/۶۶
تیمور سوری	۲۳۶۶۴۱	۳۷۵۱۵۲۱	۲۵/۳۰
چناره	۲۴۲۷۳۰	۳۷۵۴۸۴۴	۹/۹
ده‌آقا	۲۳۹۱۹۷	۳۷۵۱۴۶۶	۶/۷۵
ده‌رحم	۲۴۱۸۲۵	۳۷۵۱۵۶۹	۶/۴۸
رحمت‌آباد	۲۴۴۰۲۷	۳۷۵۱۵۶۹	۱۶/۷۴
رضاآباد	۲۴۶۳۹۱	۳۷۴۶۸۸۴	۱۶/۴۲
زیرگر	۲۴۷۵۵۴	۳۷۴۹۴۹۲	۱۴/۸۹
عادل‌آباد	۲۴۶۲۱۱	۳۷۵۱۱۵۵	۲۴/۶۱
علم‌آباد	۲۳۹۴۴۵	۳۷۴۸۸۸۴	۶/۸
فیض‌آباد	۲۴۰۶۸۷	۳۷۴۷۸۸۶	۳/۱۴
کبودیان	۲۴۴۵۴۵	۳۷۴۵۰۴۲	۳/۶۱
کلاهیج	۲۴۱۵۳۴	۳۷۵۰۱۳۴	۳/۱
مومن‌آباد	۲۴۲۹۴۳	۳۷۴۷۳۴۲	۳/۵۳
محمدآباد	۲۳۷۹۱۲	۳۷۵۵۲۱۱	۴۱/۲۷
موسی‌آباد	۲۴۲۲۷۵	۳۷۴۹۵۴۵	۸/۱۸
میان‌والان	۲۴۴۲۲۳	۳۷۴۸۶۵۸	۱۵/۰۶
نیازآباد	۲۳۷۵۷۸	۳۷۴۹۴۶۲	۱۲/۰۷
هندی	۲۴۴۳۴۱	۳۷۵۰۳۱۴	۱۴/۲۷



شکل ۱- نقشه موقعیت محدوده نسبت به حوضه‌های کشور

جدول ۲- وزن‌دهی پارامترهای مؤثر در مدل دراستیک (آلر و همکاران ۱۹۸۷)

پارامتر	ضریب وزن‌دهی
عمق آب زیرزمینی (D)	۵
تغذیه خالص (R)	۴
محیط آبخوان (A)	۳
محیط خاک (S)	۲
توپوگرافی (T)	۱
محیط غیراشباع (I)	۵
هدایت هیدرولیکی (C)	۳

جدول ۳- نرخ‌دهی به پارامترهای دراستیک (آلر و همکاران ۱۹۸۷)

بازه	نرخ	بازه	نرخ	بازه	نرخ	بازه	نرخ
عمق تا سطح ایستایی (m)	۱۰	محیط خاک	۱۰	محیط آبخوان	۲	محیط غیراشباع	۸
۰-۱/۵	۱۰	دانه درشت	۱۰	سیلت و روس	۲	ماسه	۸
۱/۵-۴/۶	۹	ماسه	۹	سیلت و روس با کمی ماسه و گراول	۴	ماسه سیلتی	۷
۴/۶-۹/۱	۷	رس	۷	ماسه با مقداری سیلت و روس	۶	ماسه رسی	۶
۹/۱-۱۵/۲	۵	ماسه لومی	۵	ماسه و گراول	۸	سیلت ماسه‌ای	۵
۱۵/۲-۲۲/۹	۳	رس لومی	۳	توپوگرافی (%)	۳	رس ماسه‌ای	۴
۲۲/۹-۳۰/۵	۲	رس متراکم و آسفالت	۱	۰-۲	۱۰	رس سیلتی	۳
>۳۰/۵	۱	هدایت هیدرولیکی (m/day)	۱	۲-۶	۹	رس	۲
تغذیه خالص (mm/years)	۱	۰-۵	۱	۶-۱۲	۵	رس متراکم	۱
<۵۱	۱	۵-۱۵	۲	۱۲-۱۸	۳		
۵۱-۱۰۲	۳	۱۵-۳۵	۴	>۱۸	۱		
۱۰۲-۱۷۸	۵	۳۵-۵۰	۶				
۱۷۸-۲۵۴	۸	۵۰-۱۰۰	۸				

جدول ۴- نمرات پتانسیل تغذیه برای منطقه مورد مطالعه (پیسکوپو، ۲۰۰۱)

الف) شیب		ب) بارندگی		ج) نفوذپذیری خاک		میزان تغذیه	
شیب %	فاکتور	بارش (mm)	فاکتور	محدوده	فاکتور	محدوده	نمره
<۲	۴	>۸۵۰	۴	زیاد	۵	۱۱-۱۳	۱۰
۲-۱۰	۳	۸۵۰-۷۰۰	۳	متوسط تا زیاد	۴	۹-۱۱	۸
۱۰-۳۳	۲	۵۰۰-۷۰۰	۲	متوسط	۳	۷-۹	۵
>۳۳	۱	<۵۰۰	۱	کم	۲	۵-۷	۳
				خیلی کم	۱	۳-۵	۱

نتایج و بحث

این پارامتر از مقدار بالایی برخوردار است که این می‌تواند به دلیل بارندگی بالای منطقه و همچنین شیب کم در اکثر مناطق این دشت باشد (شکل ۳). نقشه لایه محیط آبخوان نیز با توجه به معیارهای مدل دراستیک رتبه‌بندی شد که در نتیجه، آن منطقه شامل دو رتبه ۴ و ۵ بود (شکل ۴). لایه رستری محیط خاک تهیه و سپس بر اساس معیارهای

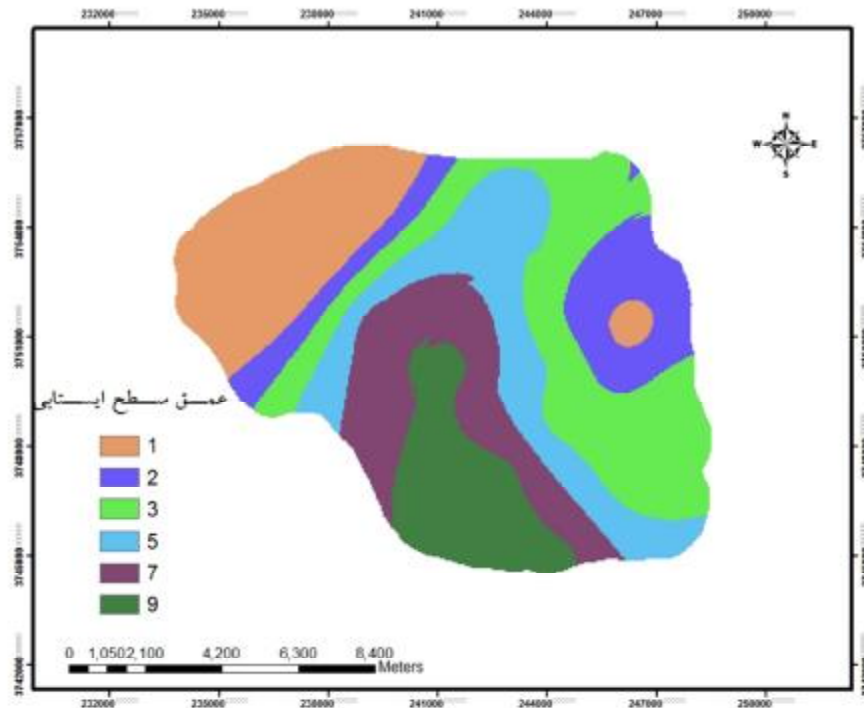
روش به دست آوردن پارامترهای مدل دراستیک در قسمت مواد و روش‌ها بیان شد. در زیر برای عدم تکرار مطالب، نقشه‌های پهنه‌بندی شده و در صورت لزوم توضیح‌های مربوطه آورده می‌شود (شکل ۲). در نقشه پهنه‌بندی شده پارامتر تغذیه خالص مشاهده می‌شود که در اکثر دشت

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک تهیه شد (شکل ۹). این شاخص برای دشت الشتر بین ۴۹ تا ۱۴۸ متغیر بود و بر اساس معیار آلر و همکاران (۱۹۸۷) به پنج محدوده مختلف تقسیم‌بندی شد که بر اساس آن ۳/۴، ۲۴/۲، ۴۱/۴، ۲۴ و ۷ درصد از آبخوان به ترتیب دارای میزان آسیب‌پذیری قابل اغماض، خیلی کم، کم، متوسط و متوسط تا زیاد شدند. با توجه به گستردگی فعالیت‌های کشاورزی در منطقه و کاربرد کودهای شیمیایی، برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل به کاربرده شده از مقادیر اندازه‌گیری‌شده نترات موجود در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. برای این منظور، ضریب همبستگی پیرسون بین مدل دراستیک و لایه نترات، محاسبه شد که برابر با ۰/۶۷ بود. بنابراین، به‌منظور افزایش همبستگی میان آنها به اصلاح مدل دراستیک پرداخته شد.

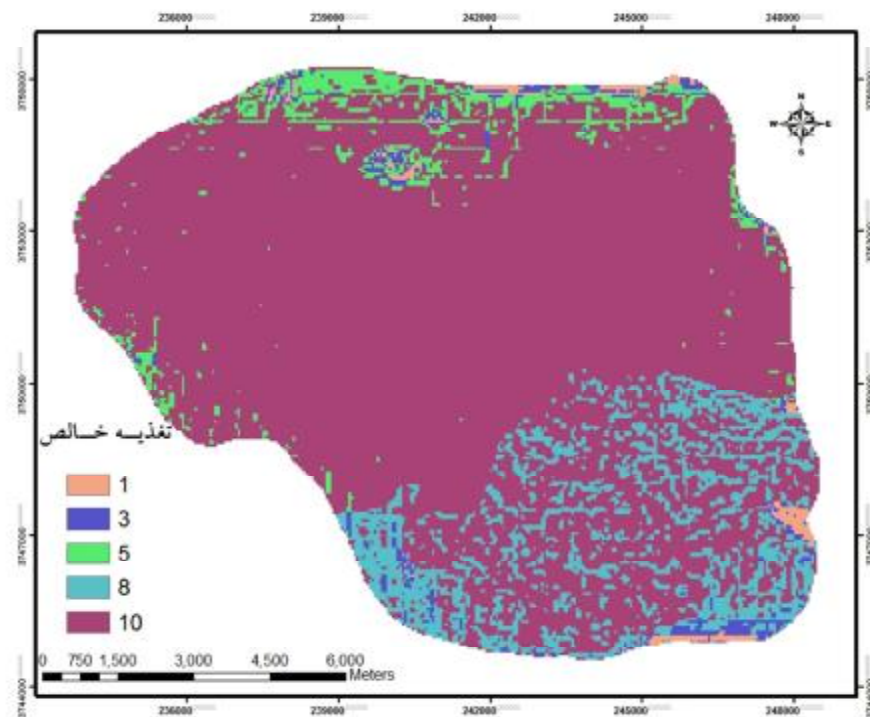
آلر و همکاران (۱۹۸۷) دسته‌بندی و ارزش‌گذاری شد (شکل ۵). در لایه توپوگرافی، همان‌طور که در شکل زیر مشخص می‌باشد، اکثر نقاط آبخوان دشت الشتر دارای شیب کم و در نتیجه دارای رتبه بالایی می‌باشند (شکل ۶). در ناحیه غیراشباع، لایه رستری تهیه می‌گردد که حاصل رتبه‌بندی از ۲۰ عدد لاگ چاه مشاهده‌ای است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، اکثر وسعت آبخوان دشت دارای مقدار متوسطی از نظر رتبه‌بندی پارامتر محیط غیراشباع بودند (شکل ۷). لایه هدایت هیدرولیکی نشان داد که بخش کثیری از آبخوان دارای رتبه پایین ۲ بود؛ ولی بقیه مساحت (شامل قسمت‌هایی از شمال غرب تا جنوب غرب) دارای هدایت هیدرولیکی بیشتری هستند (شکل ۸).

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک

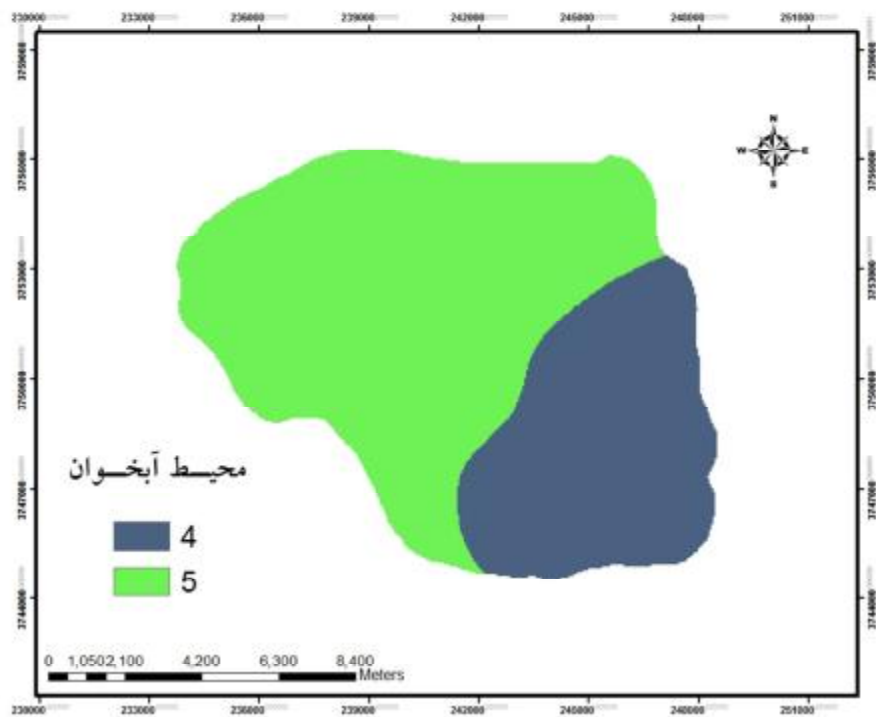
بعد از به‌کارگیری وزن پارامترهای مدل دراستیک و هم‌پوشانی هفت لایه تشکیل‌دهنده آن، نقشه پهنه‌بندی‌شده



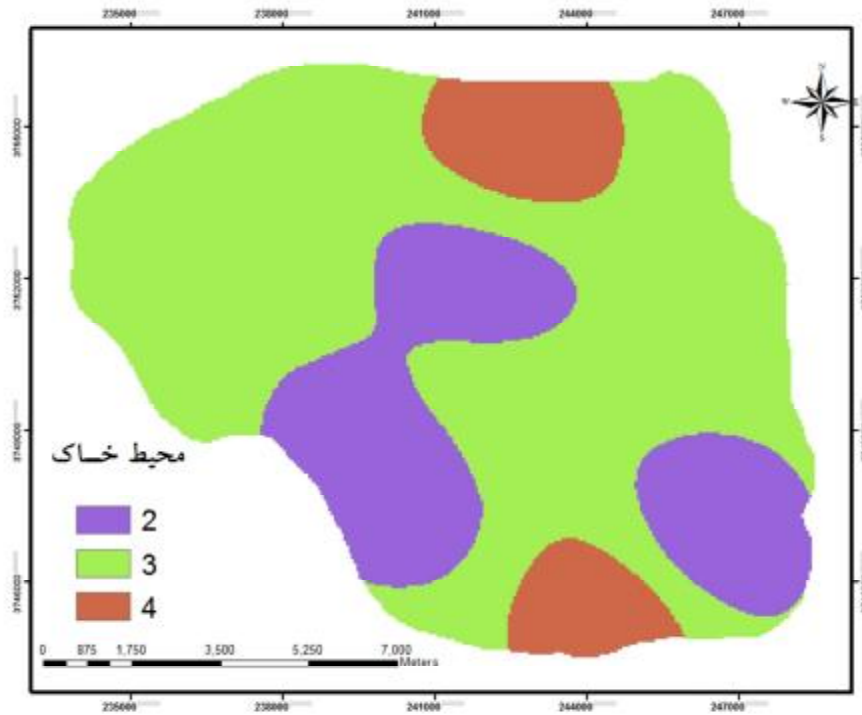
شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی عمق سطح ایستابی چاه‌های آبخوان دشت الشتر



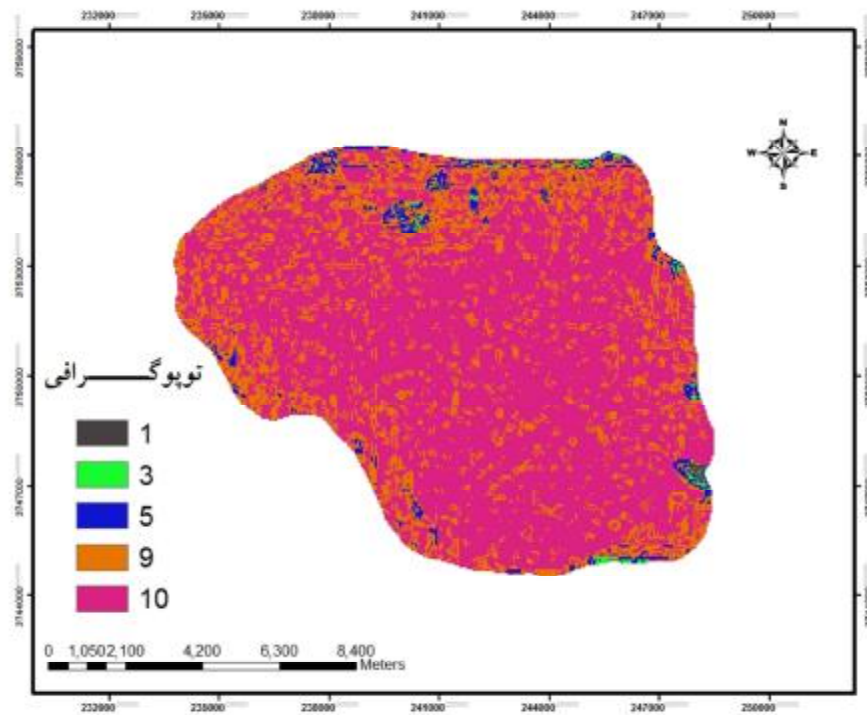
شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی پارامتر تغذیه خالص



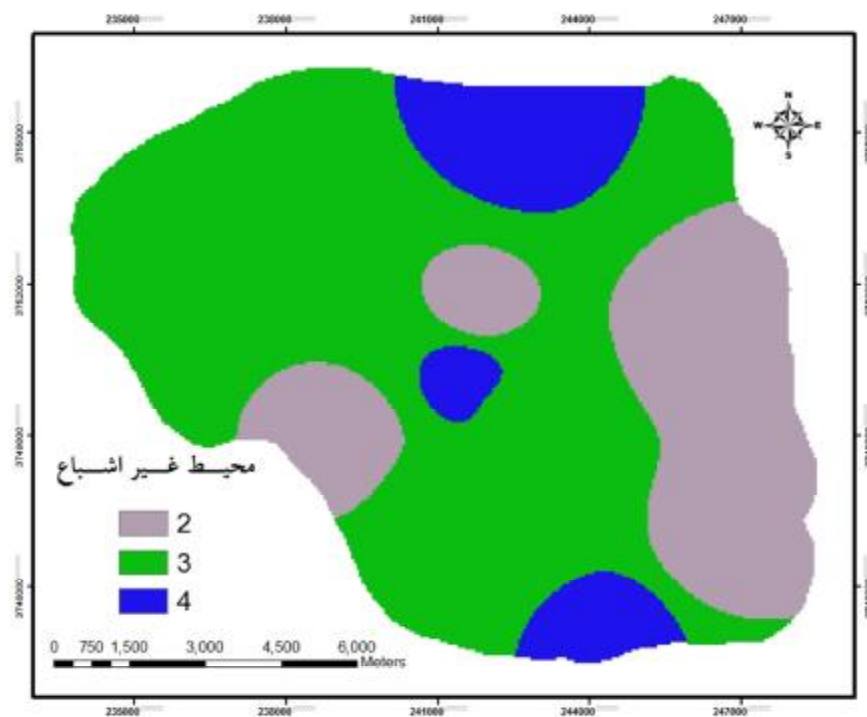
شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی پارامتر محیط آبخوان



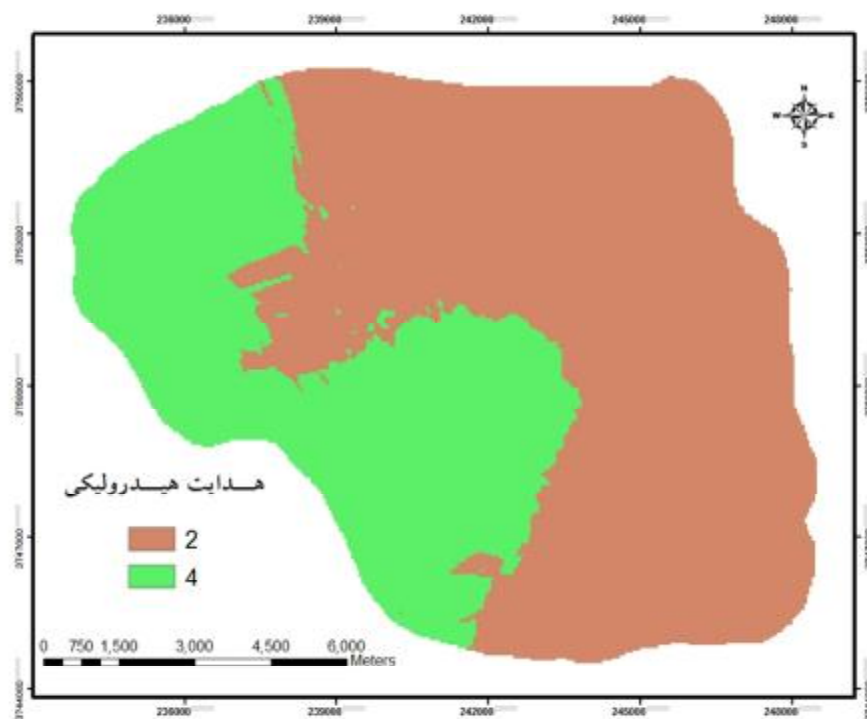
شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی پارامتر محیط خاک



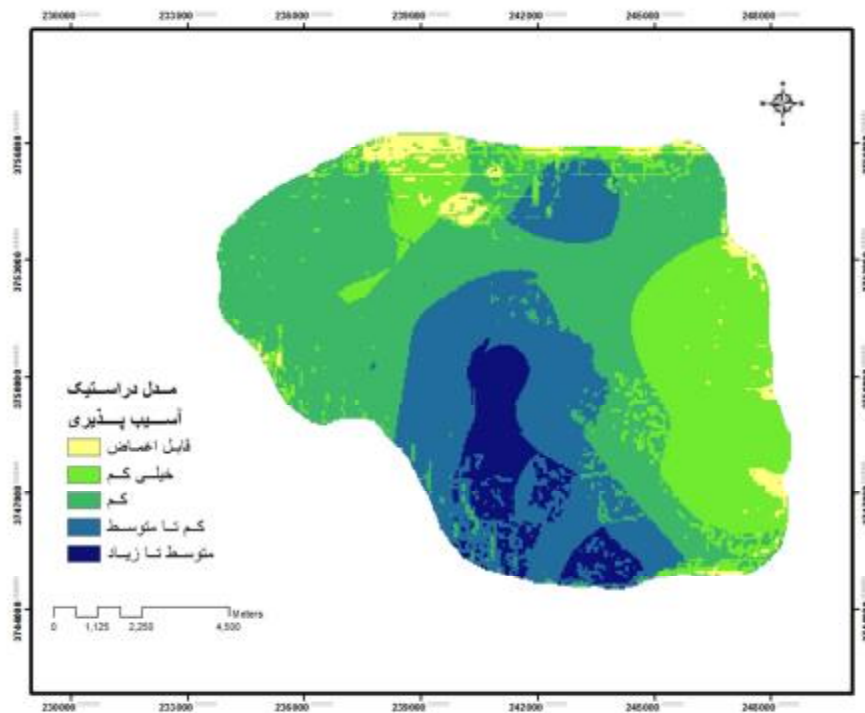
شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی توپوگرافی آبخوان دشت الشتر



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی پارامتر محیط غیراشباع



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی پارامتر هدایت هیدرولیکی



شکل ۹- نقشه قابلیت آسیب پذیری آبخوان دشت الشتر با استفاده از مدل دراستیک

نیترات (شکل ۹ و ۱۰)، ضریب همبستگی پیرسون در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به این جدول، پارامتر عمق سطح ایستابی در مقایسه با دیگر پارامترها دارای بالاترین ضریب همبستگی است و پارامترهای تغذیه خالص و محیط خاک با داشتن ضرایب همبستگی منفی کمترین همبستگی را دارند.

با توجه به تطابق نداشتن وزن‌های اختصاص یافته به پارامترها در مدل با نتایج تحلیل حساسیت، به تصحیح وزن پارامترهای آن بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه اقدام شد. بدین منظور، از روش AHP که بیشتر بر اساس قضاوت‌های کارشناسی استوار است، استفاده شد. بنابراین، بر اساس اهمیت و نقشی که در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مورد مطالعه داشتند، اولویت‌بندی و معیارها به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه شدند. سپس، یک ماتریس برای تمام پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل تشکیل شد که ورودی آن همان اعداد به دست آمده از ماتریس‌های دو به دو با نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ بود. در واقع، وزن‌های کارشناسی شده به منزله ورودی به نرم‌افزار EXPERT CHOICE داده شد و در نهایت، وزن‌های نسبی از خروجی نرم‌افزار، به عنوان

پهنه‌بندی نیترات چاه‌های دشت الشتر

بر اساس متوسط آمار پنج‌ساله سازمان آب فاضلاب شهری و روستایی استان لرستان، مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده از چاه‌های دشت الشتر از ۲۴-۴ میلی‌گرم در لیتر متغیر است که با توجه به استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2004)، برای مصارف آشامیدنی، یعنی مقدار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، غلظت نیترات در آبخوان مورد مطالعه پایین‌تر از حد مجاز می‌باشد. برای درک بهتر روند و همچنین پهنه‌بندی نیترات موجود در منطقه با کمک روش‌های درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGis 9.3، نقشه مورد نظر تهیه شد (شکل ۱۰). با توجه به شکل، مشخص است که از مناطق مرکزی آبخوان به سمت جنوب آن روند مقادیر نیترات رو به افزایش است.

نتایج تحلیل حساسیت تک پارامتری

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت تک پارامتری مدل دراستیک نشان داد که مؤثرترین پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان مورد مطالعه، پارامتر تغذیه خالص (با میانگین وزن مؤثر ۴۵/۶ درصد) است. با توجه به نقشه مربوط به پارامترهای مدل دراستیک و لایه

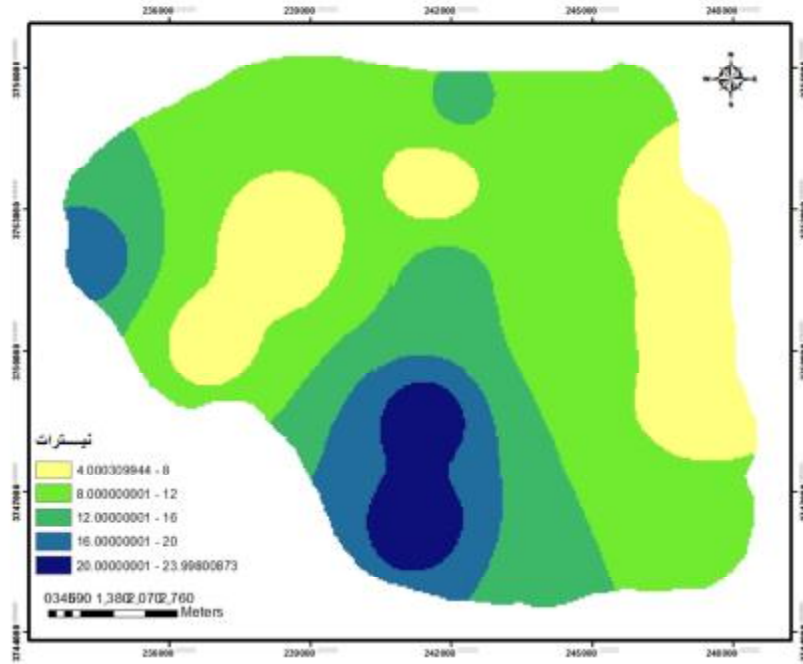
دراستیک اصلاح شده، میزان آسیب پذیری آبخوان از سمت شمال به جنوب دشت تقریباً در حال افزایش است که یک دلیل آن می‌تواند افزایش مؤثرترین پارامتر مدل یعنی عمق سطح ایستابی، از شمال به جنوب دشت باشد. همچنین، در نواحی جنوبی شیب کم نیز می‌تواند در این امر تأثیرگذار باشد. بر اساس نتایج حاصل، همبستگی بین نقشه آسیب پذیری دراستیک اصلاح شده و نقشه نیترات به ۷۹ درصد رسید که همبستگی قابل قبولی برای مدل یاد شده جهت ارزیابی پتانسیل آسیب پذیری آبخوان دشت مورد مطالعه می‌باشد. با توجه سوابق تحقیقی که در ابتدای همین مقاله به آنها اشاره شده است، تحقیقات متعددی در زمینه تعیین مناطق مستعد آلودگی انجام شده است و در همین اواخر، مشخص شد که این مدل می‌بایست با شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه نیز اصلاح شود. در مطالعه رنگزن و همکاران (۱۳۸۷) نیز در توجیه مناطق آسیب پذیر و دلیل قرار گرفتن آنها آمده است که در بیشتر بخش‌های شمالی که آسیب پذیر هستند، احتمالاً در ارتباط با دانه درشت بودن رسوبات سطحی آبرفت و آبخوان و همچنین نرخ تغذیه زیاد بوده‌اند. در مطالعه دیگری، صادقی روش و زهتابیان (۱۳۹۲) مناطق حاوی خاک‌های ریزدانه و ضریب نفوذ پایین را از عوامل دخیل در تعیین مناطق آسیب پذیر بیان کرده‌اند.

وزن‌های اصلاح شده برای تهیه نقشه آسیب پذیری بهینه شده آبخوان مورد مطالعه، به دست آمد. لازم به یادآوری است که برای کاهش خطای تصمیم‌گیری و انتخاب صحیح‌تر وزن‌ها از چندین قضاوت کارشناسی استفاده و در نتیجه چندین مدل برای محاسبه شاخص آسیب پذیری اجرا شد که بر اساس همبستگی شاخص آسیب پذیری نهایی و غلظت نیترات در آبخوان مربوطه، بهترین وزن دهی انتخاب شد. بر اساس نتایج این روش، وزن پارامتر توپوگرافی از ۱ به ۲، پارامتر محیط غیراشباع از ۵ به ۲/۸ و پارامترهای تغذیه خالص و محیط خاک به دلیل داشتن همبستگی منفی با نقشه پهنه بندی یون نیترات حذف شدند.

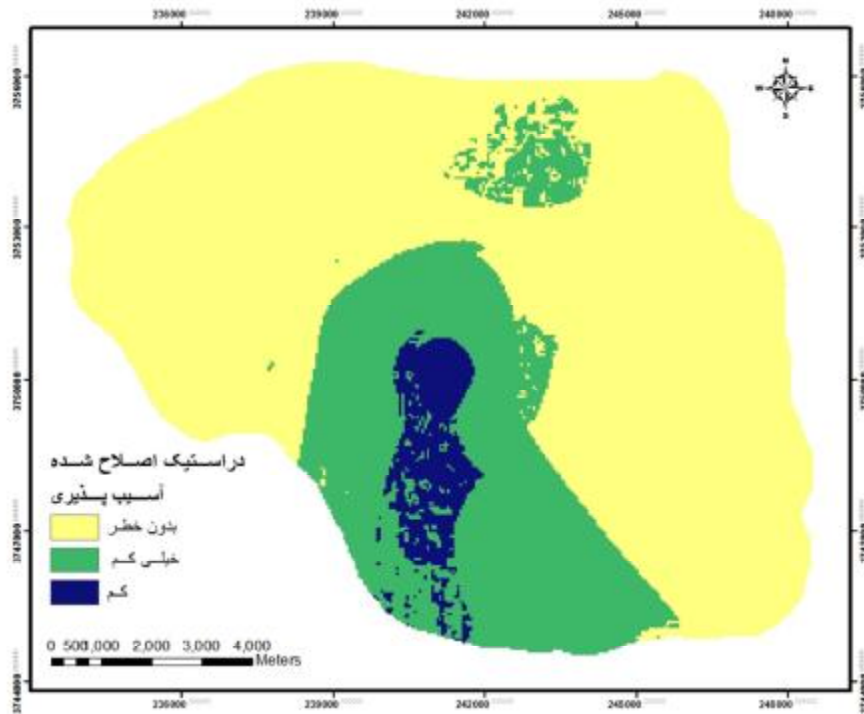
بر اساس وزن‌های اصلاح شده پارامترهای مدل، نقشه پهنه بندی شده مدل دراستیک اصلاح شده در محیط GIS تهیه و بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، شاخص آسیب پذیری مدل دراستیک اصلاح شده که مدل DATIC می‌باشد، بین ۱۰۵/۷-۳۷/۵۹ قرار دارد. با به دست آوردن شاخص نهایی، منطقه به سه دسته مختلف طبقه بندی شد. بر این اساس، ۶۷ درصد از کل مساحت منطقه، دارای آسیب پذیری قابل اغماض، ۲۴ درصد دارای آسیب پذیری خیلی کم و ۹ درصد دارای آسیب پذیری کم بودند. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، طبق مدل

جدول ۵- مقادیر نیترات چاه‌های دشت الشتر و مختصات آنها

مختصات ایستگاه (utm)			
ایستگاه	x	y	نیترات (mgr/l)
چاه ۱	۲۴۱۱۸۲	۳۷۴۹۷۴۲	۵
چاه ۲	۲۳۶۸۸۸	۳۷۵۰۲۶۲	۶
چاه ۳	۲۳۸۴۷۴	۳۷۵۲۱۳۲	۴
چاه ۴	۲۴۲۵۵۳	۳۷۵۲۵۶۵	۵
چاه ۵	۲۴۱۶۵۵	۳۷۵۳۵۳۲	۵
چاه ۶	۲۳۰۵۴۴	۳۷۵۴۷۰۷	۱۳
چاه ۷	۲۳۴۲۹۲	۳۷۵۱۹۳۵	۱۸
چاه ۸	۲۴۶۳۹۱	۳۷۴۶۸۸۰	۲۳
چاه ۹	۲۴۷۳۵۰	۳۷۵۸۱۳۰	۵
چاه ۱۰	۲۴۴۵۴۵	۳۷۴۵۰۴۲	۱۲
چاه ۱۱	۲۵۱۹۸۰	۳۷۵۰۴۲۳	۱۰
چاه ۱۲	۲۴۴۳۴۱	۳۷۵۰۳۱۴	۱۱
چاه ۱۳	۲۴۱۸۲۵	۳۷۵۱۵۶۰	۱۴
چاه ۱۴	۲۳۶۲۱۲	۳۷۵۳۷۱۱	۲۴



شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی نیترات چاه‌های دشت الشتر



شکل ۱۱- نقشه پهنه‌بندی شاخص آسیب پذیری مدل دراستیک اصلاح شده

جدول ۶- نتایج آماری تحلیل حساسیت تک پارامتری شاخص دراستیک

پارامتر	وزن تئوریک	وزن تئوریک (%)	وزن مؤثر	
			میانگین	کمینه
عمق سطح ایستابی	۵	۲۱/۷۳	۱۵/۵۸	۱/۵
تغذیه خالص	۴	۱۷/۳۹	۴۵/۶	۳۲/۸
محیط آبخوان	۳	۱۳/۰۴	۴/۳	۳/۱
محیط خاک	۲	۳/۶۹	۲/۶	۱/۷
توپوگرافی	۱	۴/۳۴	۲/۹	۰
محیط غیراشباع	۵	۲۱/۷۳	۲/۶	۱/۵۸
هدایت هیدرولیکی	۳	۱۳/۰۴	۱۲/۹	۴/۳

جدول ۷- نتایج آماری ضریب همبستگی پارامترهای شاخص دراستیک

پارامتر	ضریب همبستگی
D	۰/۷۷
R	-۰/۰۷
A	۰/۳۶
S	-۰/۱
T	۰/۰۳۲
I	۰/۳
C	۰/۳۱۶

جدول ۸- وزن‌های اولیه و اصلاحی مدل دراستیک

پارامتر	وزن اولیه	وزن بهینه
D	۵	۵
R	۴	۰
A	۳	۳
S	۲	۰
T	۱	۲
I	۵	۲/۸
C	۳	۳

نتیجه‌گیری

کم، متوسط و متوسط تا زیاد بودند. برای اعتبارسنجی مدل، از مقادیر آلاینده نیتراژ موجود در آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه استفاده شد که بر اساس نتایج حاصل، میزان ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۶۷ شد. با توجه به هدف این تحقیق سعی گردید تا میزان ضریب همبستگی بر اساس روش‌های موجود افزایش یابد و بر اساس آن، مدل اصلاح‌شده که مطابق شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه باشد، تهیه و پیشنهاد گردد. به همین منظور، از روش تحلیل حساسیت تک پارامتری استفاده شد که بر اساس آن مقدار ضریب همبستگی

در این تحقیق، هفت لایه از پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل استاندارد دراستیک بر طبق ارجاع آلر و همکاران (۱۹۸۷) تهیه و میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترهای مدل بر وضعیت آبخوان بررسی شد. بعد از به‌کارگیری وزن پارامترهای مدل دراستیک، نقشه هم‌پوشانی هفت لایه تشکیل‌دهنده مدل که نقشه پهنه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری مدل دراستیک بود، تهیه شد. بر اساس این طبقه‌بندی ۳/۴، ۴۲/۲، ۴۱/۴، ۲۴ و ۷ درصد آبخوان به ترتیب دارای میزان آسیب‌پذیری قابل اغماض، خیلی

۵. بهاروند س. ابراهیمی ب. زیودار م. و حقی آبی ا. ح. ۱۳۹۲. خلاصه گزارش تعیین میزان تبادل هیدرولیکی رودخانه و سفره آب زیرزمینی دشت الشتر با استفاده از شبکه جریان. ۸ ص.
۶. تیرماه م. واعظی ع. و اصغری مقدم الف. ۱۳۹۲. ارزیابی پتانسیل آلودگی ذاتی آبخوان دشت تبریز با استفاده از مدل DRASTIC. هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. دانشگاه شهید بهشتی. تهران. ۹-۷ آبان ۱۳۹۲. ۹ ص.
۷. خدائی ک. شهنساری ع. ا. و اعتباری ب. ۱۳۸۵. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت جوبین به روش‌های DRASTIC و GOD. مجله زمین‌شناسی ایران. ۲(۴): ۷۳-۸۵.
۸. رنگزن ک. ضیائیان فیروز آبادی. پ. میرزائی. ل. و علیجانی. ف. ۱۳۸۷. پهنه بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ورامین با استفاده از DRASTIC و ارزیابی تجربی اثر منطقه غیراشباع در محیط GIS. فصلنامه زمین‌شناسی ایران. ۲(۶): ۲۱-۳۲.
۹. صادقی روش. م. و زهتابیان. غ. ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خضرباد به روش دراستیک. فصلنامه علمی محیط‌زیست. ۵۵: ۲۱-۳۱.

10. Aller L. Bennett T. H. Jay L. and J. Petty R. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential using Hydrogeologic Setting. Envi. Research Laboratory: 38-57.
11. Babiker I. S. Mohammad M. A. A. Hiyama T. and kikuo K. 2005 A GIS-based DRASTIC Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Kakamigahara Heights. Gifu Prefecture. Central Japan. Science of the Total Environmental. 345(1-3): 127-140.
12. Chika olmo M. 2014. Categorical Indicator kriging for Assessing the Risk of Groundwater Nitrate Pollution: The Case of Vega de Granada Aquifer. Science of the Total Environmental: 229-239.
13. Civita M. 1994. Le Carte Della Vulnerabilita` Degli Acquiferi all'inquinamento. 325 p.
14. Daly D and Drew D. 1999. Irish Methodology for Karst Aquifer Protection. Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst, Rotterdam, Balkema. Ed Bologna. 267-272.
15. Foster S. S. 1987. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and

پیرسون برای پارامتر عمق سطح ایستابی، بالاترین و برای پارامترهای تغذیه خالص و محیط خاک کمترین بود. به دلیل تطابق‌نداشتن وزن پارامترهای اختصاص‌یافته به پارامترها در مدل با نتایج تحلیل حساسیت از روش رتبه‌بندی AHP استفاده شد که بر اساس نتایج آن، وزن پارامتر توپوگرافی از ۱ به ۲ و وزن پارامتر محیط غیراشباع از ۵ به ۲/۸ تغییر نمودند و پارامترهای تغذیه خالص و محیط خاک به دلیل داشتن همبستگی منفی با نقشه پهنه‌بندی یون نترات، حذف گردیدند. مدل اصلاح‌شده (DATIC)، منطقه را به سه دسته مختلف آسیب‌پذیری تقسیم‌بندی کرد که بر اساس آن، ۶۷ درصد آن قابل اغماض، ۲۴ درصد در طبقه آسیب‌پذیری خیلی کم و مقدار ۹ درصد در طبقه‌بندی آسیب‌پذیری کم قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل، مقدار همبستگی ضریب پیرسون در حالت اصلاح‌شده مدل به ۷۹ درصد ارتقا یافت که می‌تواند تأییدی بر تعریف مدل اصلاح‌شده دراستیک در منطقه مورد مطالعه باشد.

منابع

۱. آزاد شهرکی ف. آغاسی ع. آزاد شهرکی ف. و زارعی ع. ۱۳۸۹. ارزیابی پتانسیل و آنالیز حساسیت آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت هشتگرد به روش دراستیک. مجله آب و فاضلاب. ۲۱(۲): ۶۱-۷۰.
۲. افروزی م. و محمدزاده ح. ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بروجن- فرادنبه با استفاده از مدل DRASTIC بر اساس نترات. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۲): ۲۱۳-۲۱۸.
۳. امیراحمدی الف. ابراهیمی م. زنگنه اسدی م. ع. و اکبری الف. ۱۳۹۲. بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت نیشابور با استفاده از روش دراستیک در محیط GIS. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۲(۶): ۳۷-۵۶.
۴. بمانی م. اژدری مقدم م. و رضایی م. ۱۳۸۸. مقایسه مدل‌های DRASTIC و GOD در تعیین آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی دشت یزد. هشتمین کنگره بین‌المللی عمران- شیراز. اردیبهشت ۱۳۸۸. ۷ ص.

- Protection Strategy. International Conference, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research. 69-86.
16. Lathamani R. Janardhana M. R. J. Mahalingam B. and Suresha S. 2015. Evaluation of Aquifer Vulnerability using DRASTIC Model and GIS: A Case Study of Mysore City, Karnataka, India. *Aquifer procedia*. 4: 1031-1038.
 17. Piscopo G. 2001. Groundwater Vulnerability Map, Explanatory Notes, Castlereagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia.
 18. Ribeiro L. 2000. Desenvolvimento de um índice para avaliar a Susceptibilidade, ERSHA-CVRM. 8 p.
 19. Stempvoort D. V. Ewert L and Wassenaar L. 1993. Aquifer Vulnerability index: A GIS-Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping. *Canadian Water Resources Journal*. 18: 25-37.
 20. Victorine Neh A. Ako Ako A. Richard ayuk A. and Hosono T. 2015. DRASTIC-GIS Model for Assessing Vulnerability to Pollution of the Phreatic Aquifer Case Formation in Douala-cameron. *Journal of Africa earth Science*. 11: 180-190.
 21. Xiaosi S. Xu W. and Shangai D. 2014. Responses of Groundwater Vulnerability to Artificial Recharge under Extreme Weather Conditions in Shijiazhuang City, China. *Journal of water supply*. 3(3): 224-238.
 22. WHO. 1993. Guidelines for Drinking Water Quality. Recommendations, Geneva: World Health Organization. 9: 21-29.