

## ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان دشت سلماس با مدل دراستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی

بهجت سرچشمه<sup>۱</sup>، شهرام شاه‌محمدی کاللق<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۵

<sup>۱</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

<sup>۲</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shahmohammadi\_sh@iaut.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس در برابر آلودگی‌ها، با استفاده از مدل دراستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی ارزیابی شد. در مدل دراستیک، هفت پارامتر هیدروژئولوژیک مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، بافت خاک، توپوگرافی، اثر منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی تلفیق شدند. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری، سه پهنه عمده آسیب‌پذیری کم (شاخص آسیب‌پذیری ۱۰۰-۱۶۴)، آسیب‌پذیری متوسط (شاخص آسیب‌پذیری ۱۴۰-۱۰۰) و آسیب‌پذیری زیاد (شاخص آسیب‌پذیری ۱۸۳-۱۴۰) را نشان داد. گسترش پهنه‌ها با آسیب‌پذیری کم حدود ۱۳/۵۵ درصد، آسیب‌پذیری متوسط حدود ۷۲/۰۹ درصد و آسیب‌پذیری زیاد حدود ۱۴/۳۶ درصد به دست آمد. با تحلیل حساسیت به روش‌های حذف پارامتر و تک پارامتری، میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترها در آلوده‌سازی آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج هر دو تحلیل نشان داد عمق سطح ایستابی و منطقه غیراشباع مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری محدوده مطالعاتی سلماس می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری آبخوان، آلودگی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، دشت سلماس، مدل دراستیک

## Evaluation of Salmas Plain Aquifer Vulnerability to Pollution Using DRASTIC Model and GIS

B Sarcheshmeh<sup>1</sup>, Sh Shahmohammadi-Kalalagh<sup>2\*</sup>

Received: 02 February 2016

Accepted: 05 September 2016

1. Former M.Sc Students, Dept. of Water Sci. Eng., Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2. Assist. Prof., Dept. of Water Sci. Eng., Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: shahmohammadi\_sh@iaut.ac.ir

### Abstract

In this research vulnerability of Salmas-plain aquifer to pollution was evaluated using the DRASTIC model and Geographic Information System. In DRASTIC model seven effective hydrogeological parameters on groundwater contamination; namely depth of water table, aquifer net recharge, aquifer media, soil texture, topography, impact of vadose zone and hydraulic conductivity were combined. Vulnerability zoning map showed three main zones of low groundwater vulnerability zone (risk index: 64-100), moderate groundwater vulnerability zone (risk index: 100-140) and high groundwater vulnerability zone (risk index: 140-183). Areas with low, moderate and high risk zones comprise 13.55%, 72.09% and 14.36% of the studied area, respectively. Two sensitivity analyses tests including the map removal and the single-parameter sensitivity analyses were carried out. Both of sensitivity analyses tests showed that the depth of water table and vadose zone parameters had the most significant impacts on the vulnerability indexes at the studied region.

**Key words:** Aquifer vulnerability, DRASTIC model, Geographic information system, Pollution, Salmas plain

### مقدمه

توسعه روزافزون جوامع و گسترش فعالیت‌های بشری در ضمن ایجاد تمدن و تعالی، تنش‌هایی را نیز تحمیل جوامع نموده است که از آن جمله می‌توان به آلودگی محیط زیست به‌ویژه آب اشاره نمود، با افزایش جمعیت و فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و ... آلودگی‌ها نیز افزایش یافته و به مرور زمان آلودگی‌ها، آب‌های زیرزمینی (آبخوان‌ها) را نیز درگیر کرده است. از آنجائی که پایش آلودگی آب‌های زیرزمینی مشکل و پرهزینه بوده و نیز به‌دلیل استمرار آلودگی در این منابع، بهترین روش پیشگیری و جلوگیری از آلودگی آن‌ها، ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب پذیر، شناسایی منابع آلوده‌کننده و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مناسب می‌باشد (نخعی و همکاران ۱۳۹۲).

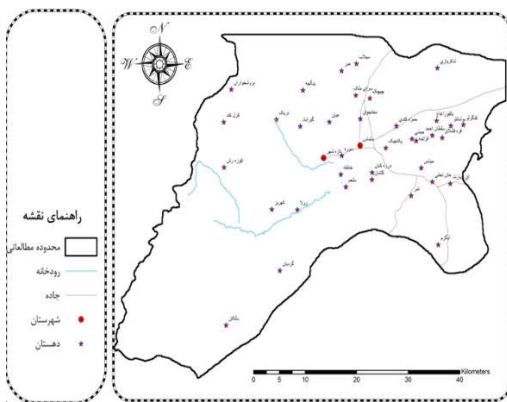
روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها ارائه شده‌است که می‌توان به روش‌های پردازشی (مبتنی بر شبیه‌سازی)، روش‌های آماری (مبتنی بر روابط همبستگی بین متغیرهای مکانی و میزان آلاینده‌ها) و روش‌های شاخص هم‌پوشانی اشاره کرد. در روش شاخص هم‌پوشانی، اطلاعات حاصل از پارامترهای مختلف به‌صورت تلفیقی و به‌طور موازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و شاخص آسیب‌پذیری برای نقاط مختلف منطقه ارائه می‌شود (امیر احمدی و همکاران ۱۳۹۰). روش‌های پردازشی که از مدل‌های شبیه‌سازی برای تخمین حرکت آلاینده‌ها استفاده می‌شود. روش‌های آماری که از روابط همبستگی بین متغیرهای مکانی و میزان آلاینده‌های موجود در آب زیرزمینی استفاده می‌شود و روش‌های شاخص هم‌پوشانی که اطلاعات

پارامترهای کنترل حرکت آلاینده‌ها از سطح زمین به آبخوان تلفیق شده و شاخص آسیب‌پذیری برای نقاط مختلف منطقه ارائه می‌شود (امیر احمدی و همکاران ۱۳۹۰). روش‌های شاخص هم‌پوشانی (رتبه‌دهی) مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی هستند، زیرا هزینه کمی دارند، به‌طور مستقیم به نتیجه می‌رسند، داده‌های مورد نیاز آن‌ها در دسترس بوده و نتایج نهایی آن‌ها به آسانی قابل توصیف بوده و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مناسب هستند (معروفی و همکاران ۱۳۹۱). در این روش‌ها ماهیت آلاینده به عنوان عامل مدیریتی آسیب‌پذیری در نظر گرفته نمی‌شود (آسیب‌پذیری ذاتی)، بلکه هدف اصلی این مدل‌ها مشخص نمودن مناطق مستعد آلودگی در آب‌های زیرزمینی و اعمال مدیریت و سیاست‌های عملی و کاربردی در مورد پیشگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی است. در روش‌های شاخص هم‌پوشانی، اهمیت نسبی هر پارامتر نسبت به سایر پارامترها ارزیابی شده و تأثیرگذاری هر کدام مشخص می‌شود، وزن و رتبه پارامترها نیز بر این اساس تعیین می‌شود. یکی از علل عدم قطعیت این روش‌ها ارزش‌گذاری (رتبه‌دهی) با نظر کارشناسی می‌باشد (خدایی و همکاران ۱۳۸۵). روش DRASTIC پرکاربردترین روش شاخص هم‌پوشانی بوده و ارزیابی دقیق‌تری از آسیب‌پذیری آبخوان‌ها ارائه می‌کند (آزاد شهرکی و همکاران ۱۳۸۹). کم بودن نسبی داده‌های لازم، سهولت به دست آوردن داده‌ها، دقت آماری بالا، هزینه کم، استفاده در مناطق وسیع، از مزایای این روش می‌باشد. مطالعات زیادی با استفاده از روش دراستیک انجام شده است. خدائی و همکاران (۱۳۸۲ و ۱۳۸۵) در دشت بهبهان و دشت جویین تحقیقاتی را در زمینه ارزیابی پتانسیل آلودگی با مدل دراستیک انجام دادند. چیت‌سازان و اختری (۱۳۸۵) با به‌کارگیری مدل دراستیک در دشت زوبرچری و خران نشان دادند که بخش غرب و جنوب غربی این آبخوان دارای آسیب‌پذیری متوسط است و نواحی کوچکی در

شمال غرب و شرق منطقه مورد مطالعه در محدوده بدون خطر قرار داشتند. سایر بخش‌های آبخوان نیز آسیب‌پذیری پایینی را نشان دادند. احمدی و آبرومند (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای به بررسی پتانسیل آلودگی آبخوان دشت خاش با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداختند. نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری، دو پهنه عمده آسیب‌پذیری متوسط و کم را نشان دادند. در تحقیقی تحت عنوان ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت داورزن به روش دراستیک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقشه پهنه‌بندی ایجاد شده نشان داد که حدود ۲۳/۲ درصد از منطقه مورد مطالعه در محدوده آسیب‌پذیری خیلی کم، ۲۱/۴ درصد آسیب‌پذیری کم ۱۷/۳۸ درصد آسیب‌پذیری متوسط، ۲۵/۴۳ درصد آسیب‌پذیری زیاد و ۱۲/۵۹ درصد در محدوده آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار داشت همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که میزان آلودگی و پتانسیل آلودگی آبخوان بسیار بالا بوده و این مسئله توجه و مراقبت آبخوان داورزن را ایجاب می‌کرد (امیر احمدی و همکاران ۱۳۹۰). در تحقیق دیگری آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلفچگان - نیزار در برابر آلودگی کشاورزی، به کمک مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی ارزیابی شد. نتایج مربوط به حریم‌های مختلف کیفی نشان داد که حریم کیفی محدوده مطالعاتی در ۴ محدوده حریم‌های خیلی کم، کم، متوسط و بالا قرار دارد (احمدی و همکاران ۱۳۹۲). مدل دراستیک در کشورهای دیگر نظیر هند (رحمان ۲۰۰۸)، الجزایر (سامی و گانگ ۲۰۰۸)، یونان (آنتوناکوس و لمبراکیس ۲۰۰۷)، ژاپن (بابیگر و همکاران ۲۰۰۵)، اردن (الادمت و همکاران ۲۰۰۳)، امارات متحده عربی (زابت ۲۰۰۲)، کره جنوبی (کیم و هام ۱۹۹۹) و ... مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اهمیت قرارگیری دشت سلماس در حوضه دریاچه ارومیه و همچنین اهمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه که برای مقاصد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، حفاظت این مناطق به منظور جلوگیری از آلودگی و مدیریت بهینه منابع

کرتاسه، ماسه‌سنگ و کنگلومرای ائوسن از سازندهای کربناته کم اثر و سنگ‌های آذرین، دگرگونی و آمیزه رنگین جز سنگ‌های غیرکربناته بی‌اثر در تشکیل منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌آیند (آقازاده و همکاران ۱۳۸۷).

بررسی‌های هیدروژئولوژیکی نشان می‌دهد که در دشت سلماس دو نوع سفره آب زیرزمینی وجود دارد که سفره اول از نوع آزاد بوده و در زیر آن یک سفره تحت فشار وجود دارد بیشینه ضخامت رسوبات آبرفتی در دشت سلماس بیش از ۱۵۰ متر و در بخش میانی دشت می‌باشد که اندازه و قطر ذرات تشکیل دهنده آبرفت در غرب دشت و در مجاور مخروط افکنه زولاچای دانه درشت و به طرف مرکز و خروجی دشت ضخامت آبرفت بیشتر و دانه‌ریزتر می‌شود (بی‌نام ۱۳۸۵). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

#### مدل دراستیک

روش دراستیک یکی از روش‌های شاخص هم-پوشانی است که اولین بار توسط آلر و همکارانش در سال ۱۹۸۷ برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ایالات متحده مطرح شد، که بر مفهوم وضعیت هیدروژئولوژیکی استوار است. وضعیت هیدروژئولوژیکی بیانگر ترکیبی از همه فاکتورهای زمین‌شناسی و آب‌شناسی است که حرکت آب‌های زیرزمینی را در یک منطقه کنترل می‌کند. در مدل

آب ضروری است. از طرفی علی‌رغم تحقیقات متعدد صورت گرفته در منطقه دشت سلماس با انواع مدل‌ها و روش‌ها، هنوز کارآیی مدل دراستیک مورد ارزیابی قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق، پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس با مدل دراستیک در محیط نرم‌افزاری ArcGIS مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

#### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بین  $37^{\circ} 51'$  تا  $38^{\circ} 22'$  عرض شمالی و در شمال شرقی و  $44^{\circ} 13'$  تا  $45^{\circ} 10'$  طول محدوده مطالعاتی ارومیه و در غرب دریاچه ارومیه واقع است. وسعت آن معادل ۵۵۰ کیلومترمربع بوده و دارای متوسط ارتفاع ۱۳۴۰ متر از سطح دریاها آزاد می‌باشد. رودخانه زولاچای با چند شاخه اصلی و فرعی، نزولات جوی منطقه را به دریاچه ارومیه منتقل می‌کند. بیشینه ارتفاع محدوده حدود ۳۰۰۰ متر و کمینه آن حدود ۱۲۷۰ متر می‌باشد. متوسط بارندگی کل حوضه حدود ۳۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. کمینه و بیشینه دمای آن به-ترتیب ۱۴- درجه سلسیوس و ۳۶+ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است.

#### ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی

منطقه مورد مطالعه و مناطق اطراف آن با توجه به تقسیمات واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران، بخشی از زون خوی- مهاباد می‌باشد. در حوضه آبریز آبخوان دشت سلماس انواع مختلفی از سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی رخنمون داشته که طیف سنی آن‌ها وسیع می‌باشد. سنگ‌های آهکی که قدیمی‌ترین تشکیلات زمین‌شناسی در حاشیه دشت هستند مربوط به دوره پرمین بوده و در قسمت‌های شمال و شرق منطقه تشکیلات مربوط به الیگو میوسن دیده می‌شود که رسوبات مربوط به میوسن به صورت مارن و ماسه‌سنگ با میان لایه‌ای از نمک و گچ هستند. سازند قم و روته با لیتولوژی آهک و آهک دولومیتی و نیز آهک‌های پلاژیک مربوط به کرتاسه از سازندهای کربناته موثر، باروت، شیل‌های

جدول ۱- وزن‌های اختصاصی پارامترهای مدل دراستیک (آلر و همکاران ۱۹۸۷).

وزن	پارامتر
۵	عمق تا سطح ایستابی
۴	تغذیه خالص
۳	محیط آبخوان
۲	بافت خاک
۱	توپوگرافی
۵	محیط غیراشباع
۳	هدایت هیدرولیکی آبخوان

#### لایه تغذیه خالص

جهت تهیه لایه تغذیه از روش پیسکوپو (پیسکوپو ۲۰۰۱) مطابق رابطه ۱ استفاده شد. پیسکوپو (۲۰۰۱) پتانسیل تغذیه یک منطقه، براساس میزان بارندگی، شیب و میزان نفوذپذیری را جایگزین روش ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده<sup>۱۰</sup> کرد. جهت محاسبه میزان تغذیه یک مدل رقومی ارتفاع (DEM) از منطقه تهیه شد. سپس شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از DEM موجود استخراج شده و با استفاده از معیارهای جدول ۳ طبقه‌بندی شد. نقشه نفوذپذیری (مستخرج از نقشه کاربری اراضی) و بارندگی منطقه (متوسط بارندگی حاصل از ۲۵ ایستگاه) نیز با توجه به معیارهای جدول مذکور تهیه و طبقه‌بندی گردید. سرانجام بعد از تهیه نقشه‌های مذکور برای به‌دست آوردن لایه تغذیه خالص، هر سه نقشه شیب، نفوذپذیری و بارندگی منطقه هم-پوشانی شدند و نقشه تغذیه خالص حاصل گردید.

تغذیه خالص  $\Rightarrow$  درصد شیب + میزان بارندگی +

میزان نفوذپذیری

[۱]

دراستیک، هفت پارامتر هیدروژئولوژیک مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی شامل عمق تا سطح ایستابی<sup>۱</sup>، تغذیه خالص آبخوان<sup>۲</sup>، محیط آبخوان<sup>۳</sup>، بافت خاک<sup>۴</sup>، توپوگرافی<sup>۵</sup>، تاثیر منطقه غیراشباع<sup>۶</sup> و هدایت هیدرولیکی<sup>۷</sup> به‌صورت تلفیقی و به‌طور موازی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی پردازش می‌گردند. واژه DRASTIC متشکل از حروف اول پارامترهای هیدروژئولوژیک در این روش می‌باشد. به‌طور کلی این مدل شامل سه بخش وزن (به هر پارامتر دراستیک با توجه به اهمیت تأثیر آن پارامتر در آلودگی عددی بین ۱ تا ۵ مطابق جدول ۱ داده می‌شود)، محدوده (هر پارامتر دراستیک خود به زیربخش‌هایی تقسیم می‌شود) و رتبه (برای هر یک از زیربخش‌های موجود در هر پارامتر ارزش عددی بین ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته می‌شود) می‌باشد.

#### تهیه لایه‌های اطلاعاتی مدل دراستیک

##### لایه عمق تا سطح ایستابی

اطلاعات آماری عمق آب زیرزمینی از داده‌های اندازه‌گیری شده ماهانه سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه مطالعاتی حاصل گردید و بعد از بررسی صحت و سقم داده‌ها و در صورت لزوم تصحیح آن‌ها، در محیط اکسل جدول اطلاعات عمق سطح آب در دوره‌ی آماری ۹۳-۹۲ (سال آبی) تهیه و به ساختار قابل قبول برای نرم‌افزار ArcGIS تبدیل گردید. سپس با استفاده از الگوریتم درون یابی کریجینگ<sup>۸</sup>، داده‌های نقطه‌ای موجود به فرمت رستر تبدیل و طبقه‌بندی<sup>۹</sup> شده مدل براساس جدول ۲ انجام گرفته و سپس نقشه هم‌ارزش عمق آب زیرزمینی برای تلفیق و هم‌پوشانی با نقشه‌های لایه‌های دیگر تهیه شد.

6 Impact of vadose zone

7 Hydraulic conductivity

8 Kriging

9 Reclassify

10 USEPA

1 Depth to water

2 Recharge

3 Aquifer media

4 Soil type

5 Topography

جدول ۲- رتبه های مربوط به پارامترهای مدل دراستیک در منطقه مورد مطالعه.

رتبه	محدوده پارامتر	رتبه	محدوده پارامتر
	<b>محیط خاک</b>		<b>عمق تا سطح ایستابی (m)</b>
۱۰	بافت سطحی خیلی سبک	۹	۰-۲۰
۷	بافت سطحی سبک	۷	۲۰-۳۰
۳	بافت سطحی سنگین	۵	۳۰-۵۰
۱	بافت سطحی خیلی سنگین	۳	۵۰-۷۰
	<b>محیط غیراشباع</b>	۱	۷۰<
۸	شن و ماسه		<b>تغذیه خالص (mm yr<sup>-1</sup>)</b>
۶	شن و ماسه همراه اندکی رس و سیلت	۸	۱۷۵-۲۵۰
۵	رس و سیلت و شن و ماسه	۵	۱۰۰-۱۷۵
۴	رس و سیلت همراه اندکی ماسه	۳	۵۰-۱۰۰
۲	رس و سیلت	۱	۰-۵۰
	<b>هدایت هیدرولیکی (m day<sup>-1</sup>)</b>		<b>محیط آبخوان</b>
۹	۹۰<	۹	شن و ماسه
۶	۶۰-۹۰	۷	شن و ماسه و اندکی رس و سیلت
۴	۳۰-۶۰	۵	رس و سیلت و شن و ماسه
۲	۰-۳۰	۳	رس و سیلت همراه اندکی ماسه
		۲	رس و سیلت
			<b>توپوگرافی (شیب %)</b>
		۱۰	۰-۱۰
		۷	۱۰-۳۰
		۴	۳۰<

جدول ۳- رتبه بندی لایه های تشکیل دهنده لایه تغذیه (پیسکوپو ۲۰۰۱).

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

### لایه محیط آبخوان

اطلاعات مربوط به محیط آبخوان از کاوش های زیر سطحی (لاگ چاه های اکتشافی و مشاهده ای) به دست آمد. برای تهیه لایه محیط آبخوان بر حسب نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر کدام از لاگ ها، نمره مربوط به محیط آبخوان با استفاده از مدل دراستیک

محاسبه و سپس این اطلاعات وارد بانک اطلاعات شد و بر اساس مختصات جغرافیایی مربوطه، به یک لایه نقطه ای تبدیل شده و سپس با استفاده از الگوریتم درونیابی به کل منطقه تعمیم داده شد و سپس بر اساس جدول ۲ طبقه بندی مدل دراستیک انجام گرفت و نقشه هم ارزش محیط آبخوان حاصل گردید.

### لایه بافت خاک

با روشی مشابه محیط آبخوان و طبق جدول ۲ رتبه‌بندی گردید و نقشه رتبه‌بندی شده محیط غیراشباع ارائه شد. با این تفاوت که برای لایه محیط غیراشباع، ضخامت و جنس لایه‌های بالایی سطح ایستابی در لاگ چاه‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

### لایه هدایت هیدرولیکی اشباع

هدایت هیدرولیکی اشباع به قابلیت هدایت آب توسط مواد آبخوان گفته می‌شود که توسط تخلخل مواد تشکیل‌دهنده آبخوان کنترل می‌شود. این مفهوم باید با مفهوم محیط آبخوان به خوبی تفکیک شود زیرا ممکن است محیط آبخوان تا حدی نفوذناپذیر باشد ولی شامل شکاف‌های بزرگ باشد. با توجه به در دسترس نبودن داده‌های آزمایش پمپاژ، برای تهیه لایه مذکور از لاگ‌های حفاری و جنس و ترکیب آبخوان در هر لاگ و جدول‌های تعیین ضرایب نفوذپذیری (تاد و مایز ۲۰۰۵) استفاده شد و با در نظر گرفتن عمق بخش اشباع آبخوان مقادیر هدایت هیدرولیکی مربوط به محدوده هر لاگ تعیین گردید و به یک لایه نقطه‌ای تبدیل شد در نهایت با استفاده از الگوریتم درونیابی نقاط ذکر شده به فرمت رستر تبدیل شده و بر اساس جدول ۲ رتبه‌بندی گردید و نقشه هدایت هیدرولیکی منطقه تهیه شد.

### نتایج و بحث

#### نقشه لایه‌های اطلاعاتی مدل دراستیک

نقشه رتبه‌بندی لایه‌های عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، بافت خاک، توپوگرافی، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع منطقه مورد مطالعه از نظر پتانسیل آلودگی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است.

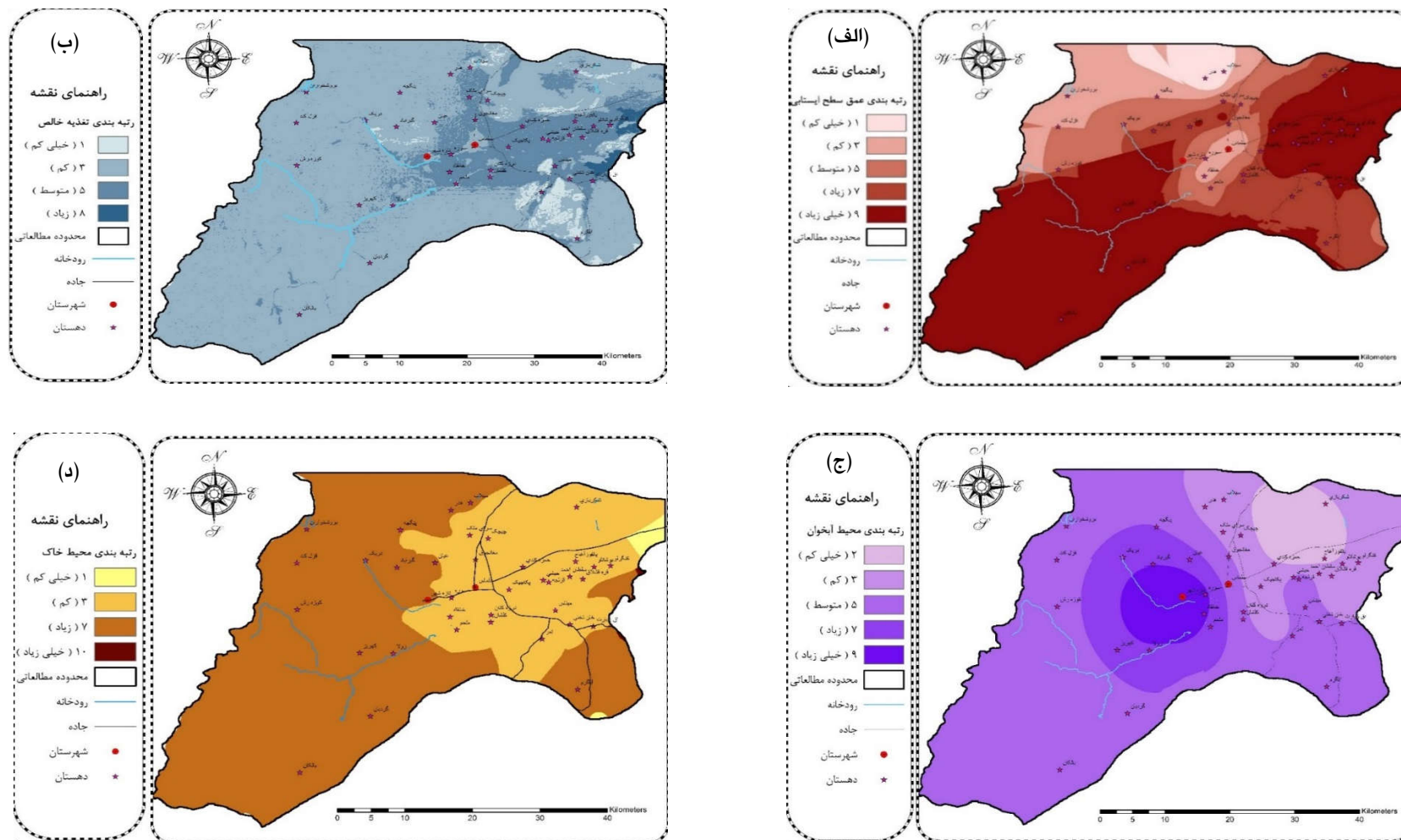
منظور از بافت خاک، ناحیه بالایی منطقه غیراشباع زمین است که تا حد نفوذ ریشه گیاهان ادامه دارد و به طور متوسط عمقی در حدود ۶ فوت (۱/۸۲ متر) یا کمتر را تحت پوشش قرار می‌دهد (آلر و همکاران ۱۹۸۷). خاک و بافت آن اثر قابل توجهی بر مقدار آب نشت کرده به زمین دارد. هر چه اندازه ذرات تشکیل دهنده خاک ریزتر باشد نفوذپذیری کمتر و پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی نیز کمتر خواهد بود (تبرمایه و واعظی هیر ۱۳۹۳). اطلاعات این لایه از نقشه خاک رقومی شده کشوری استخراج و به صورت یک لایه رستری ذخیره شد و با استفاده از جدول ۲ نرخ‌بندی گردید و نقشه رتبه‌بندی شده بافت خاک حاصل گردید.

### لایه توپوگرافی

این لایه به تغییرات شیب سطح زمین مربوط می‌شود. هر چه شیب کمتر، فرصت نفوذ برای مواد آلاینده بیشتر و پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی نیز بیشتر می‌شود. توپوگرافی با تأثیر بر توسعه خاک سطحی نیز بر پتانسیل آلودگی تأثیر می‌گذارد (آلر و همکاران ۱۹۸۷). برای تهیه لایه توپوگرافی ابتدا مدل رقومی ارتفاعی منطقه (DEM) از فایل‌های رقومی سازمان جغرافیایی تهیه گردید و پس از ویرایش DEM به دست آمده در محیط ArcGIS شیب منطقه محاسبه و استخراج گردید و سپس با توجه به رتبه‌بندی مدل دراستیک (جدول ۲)، نقشه لایه توپوگرافی تهیه گردید.

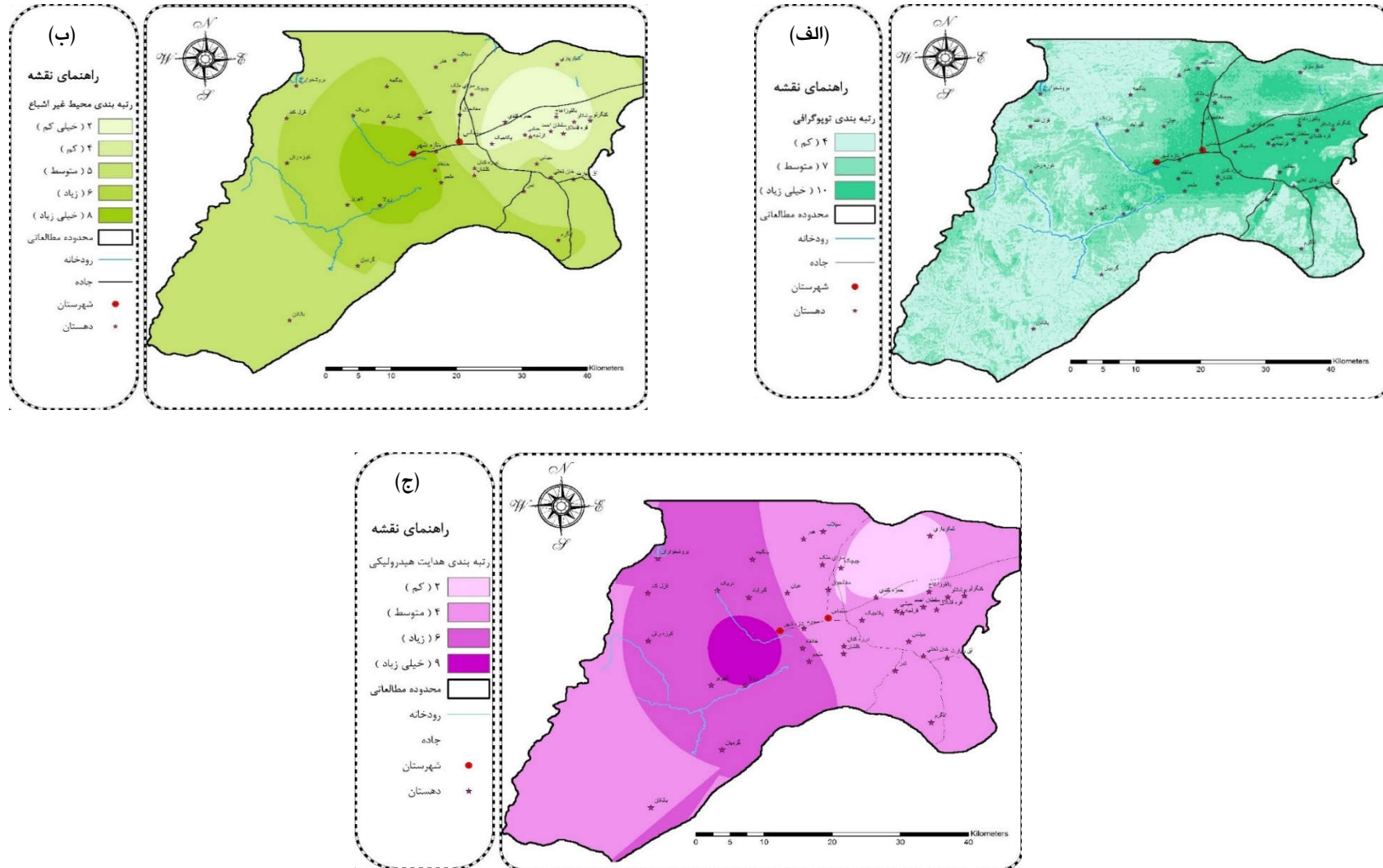
### لایه محیط غیراشباع

این لایه در قسمت زیرین خاک سطحی تا سطح ایستابی قرار دارد. میزان تأثیر این لایه تابعی از نفوذپذیری و خصوصیات محیط غیراشباع می‌باشد. در مدل دراستیک شرایط منطقه غیراشباع تأثیر زیادی بر پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی دارد (آلر و همکاران ۱۹۸۷، تبرمایه و واعظی هیر ۱۳۹۳). برای تهیه این لایه از لاگ چاه‌های اکتشافی و مشاهده ای استفاده نموده و



شکل ۲- رتبه بندی لایه های (الف) عمق سطح ایستابی، (ب) تغذیه خالص، (ج) محیط آبخوان و (د) محیط خاک منطقه مطالعاتی از نظر پتانسیل آلودگی.





شکل ۳- رتبه‌بندی لایه‌های: الف) توپوگرافی، ب) محیط غیر اشباع و ج) هدایت هیدرولیکی منطقه مطالعاتی از نظر پتانسیل آلودگی.

که در محدوده نامناسب از نظر پتانسیل آلودگی آبخوان قرار دارند توجه بیشتری شود.

جدول ۴- شاخص دراستیک منطقه مطالعاتی.

شاخص دراستیک	محدوده دراستیک	مساحت (Km <sup>2</sup> )	مساحت (%)
آسیب- پذیرگی کم	۶۴-۱۰۰	۳۳۵/۳۸	۱۳/۵۵
آسیب- پذیرگی متوسط	۱۰۰-۱۴۰	۱۷۸۴/۶۳	۷۲/۰۹
آسیب- پذیرگی زیاد	۱۴۰-۱۸۲	۳۵۵/۴۶	۱۴/۳۶
جمع کل	۶۴-۱۸۲	۲۴۷۵/۴۷	۱۰۰

#### تحلیل حساسیت

##### تحلیل حساسیت با حذف یک پارامتر یا لایه

در این روش ابتدا هر کدام از پارامترها به طور جداگانه از محاسبات حذف و شاخص تغییرپذیری دراستیک محاسبه و مؤثرترین پارامتر بر آلودگی آب-های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. میزان حساسیت مدل به روش حذف تک پارامتر مطابق رابطه ۳ (بایبکر و همکاران ۲۰۰۵) محاسبه گردید.

$$S = \left| \frac{V/N - V'/n}{V} \right| \times 100 \quad [3]$$

که S میزان حساسیت یا شاخص تغییرپذیری را نشان می‌دهد V و V' به ترتیب شاخص‌های آسیب‌پذیری بدون حذف و با حذف پارامتر می‌باشند N و n تعداد لایه‌های مورد استفاده در محاسبه V و V' می‌باشند. جدول ۵ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف پارامتر، با حذف یکی از لایه‌ها را نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۵، پارامتر عمق تا سطح آب (D) با میانگین حساسیت ۳/۳۱۵، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر بر روی شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد (مشابه تحقیق تبرمایه و واعظی هیر (۱۳۹۳)). در حالی که نخعی و همکاران (۱۳۹۲) و احمدی و آبرومند (۱۳۸۸)، تغذیه

#### شاخص دراستیک<sup>۱۱</sup>

از حاصل ضرب نمره یا رتبه خاص منطقه در وزن آن پارامتر، شاخص آن پارامتر محاسبه می‌شود و شاخص نهایی DRASTIC از مجموع شاخص‌های پارامترهای هفت‌گانه مطابق رابطه ۲ حاصل می‌شود. هر چه شاخص DRASTIC بیشتر باشد خطر آلودگی نیز بیشتر خواهد بود.

$$DI = \sum_{i=1}^7 (Wi \times Ri) \quad [2]$$

در رابطه فوق، DI شاخص دراستیک و Wi وزن هر پارامتر و Ri رتبه هر پارامتر می‌باشد (آلر و همکاران ۱۹۸۷).

کمینه مقدار برای شاخص دراستیک در منطقه مطالعاتی با استفاده از پارامترهای فوق برابر ۶۴ و بیشینه آن برابر ۱۸۳ حاصل شد در حالی که این مقدار در تحقیق تبرمایه و واعظی هیر (۱۳۹۳)، ۹۵-۱۶۷، در تحقیق صادقی روش و زهتابیان (۱۳۹۲)، ۴۵-۱۴۲ و در تحقیق معروفی و همکاران (۱۳۹۱)، ۶۱-۱۴۲ به دست آمد. بازه شاخص دراستیک با توجه به جدول طبقه‌بندی آلر و همکاران (۱۹۸۷) به سه رده طبقه‌بندی گردید و در جدول ۴ ارائه شد و نقشه نهایی آلودگی آبخوان نیز پس از هم‌پوشانی لایه‌ها به صورت نقشه ۴ به دست آمد. براساس جدول ۴، ۱۴/۳۶ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی دارای آسیب‌پذیری زیاد می‌باشد این مقدار در مقایسه با دشت تبریز با ۰/۲۶ درصد آسیب‌پذیری زیاد (تبرمایه و واعظی هیر ۱۳۹۳) و دشت ملایر با ۱/۴۴ درصد آسیب‌پذیری زیاد (معروفی و همکاران ۱۳۹۱) عدد بزرگتری بوده و بیان‌گر پتانسیل آلودگی و آسیب‌پذیری تقریباً " ۵۵ و ۱۰ برابری دشت سلماس به ترتیب نسبت به دشت‌های تبریز و ملایر می‌باشد. مطابق شکل ۴، بیشترین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مربوط به محدوده‌ای در قسمت مرکزی منطقه مورد مطالعه می‌باشد و سایر قسمت‌ها دارای آسیب‌پذیری کم یا متوسط می‌باشند. بنابراین در توسعه شهری، صنعتی و کشاورزی، بایستی به نواحی

<sup>11</sup> Drastic index

تک‌پارامتری مطابق جدول ۶، وزن‌های مؤثر و تئوریک پارامترها با هم مقایسه می‌شوند. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که پارامتر محیط غیراشباع (I) با میانگین وزن مؤثر ۱۸/۷۴ و عمق تا سطح ایستابی (D) با میانگین وزن مؤثر ۱۶/۲ به عنوان مؤثرترین پارامترها در ارزیابی آسیب‌پذیری می‌باشند و نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف نقشه را نیز تایید می‌کنند. وزن مؤثر پارامترهای مدل دراستیک در محدوده مطالعاتی انحرافات نسبی به وزن‌های نظری دارد و کاملاً بر هم منطبق نیستند بنابراین می‌توان به این نکته پی‌برد که وزن‌ها و رتبه‌های نسبت داده شده به پارامترهای شاخص دراستیک کاملاً صحیح نبوده و می‌توان وزن‌ها و رتبه‌های اختصاص یافته را تصحیح کرد.

خالص آبخوان (R) را به‌عنوان موثرترین پارامتر در شاخص آسیب‌پذیری معرفی کردند.

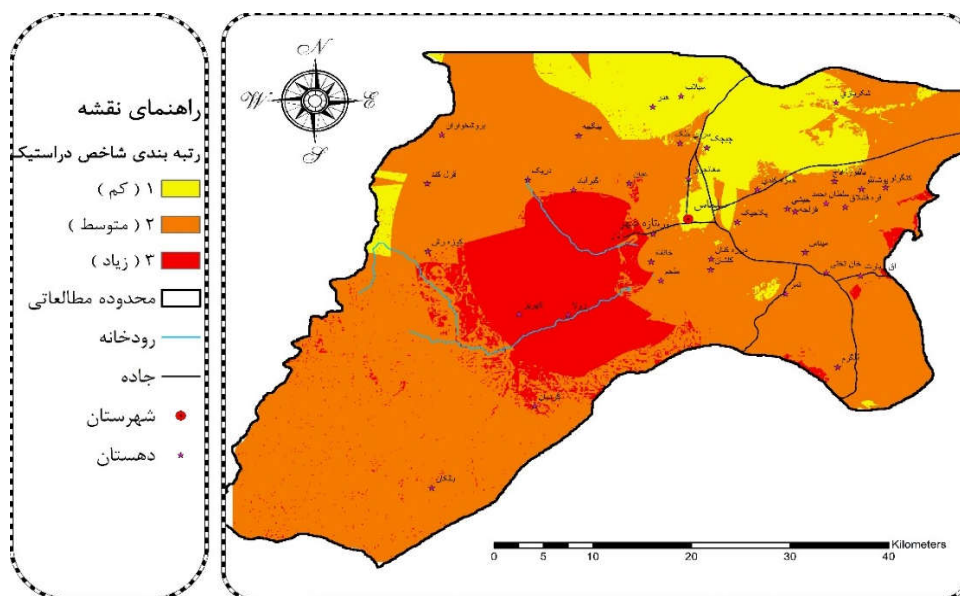
**تحلیل حساسیت با یک لایه یا پارامتر**

در این روش، وزن مؤثر هر پارامتر با استفاده از رابطه ۴ (ناپولیتو و فابری ۱۹۹۶) محاسبه شد.

$$W = (PrPw/V) \times 100 \quad [4]$$

که W وزن مؤثر پارامتر، Pr و Pw به ترتیب رتبه و وزن پارامتر و V شاخص نهایی آسیب‌پذیری می‌باشد.

با توجه به اینکه نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف نقشه در قسمت قبل، تأثیر هر یک از هفت پارامتر ورودی را در ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در منطقه مورد مطالعه نشان داد، در تحلیل حساسیت



شکل ۴- نقشه نهایی پتانسیل آسیب‌پذیری محدوده مطالعاتی.

جدول ۵- نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف یک پارامتر.

پارامتر حذفی	میانگین (S <sub>mean</sub> )	بیشینه (S <sub>max</sub> )	کمینه (S <sub>min</sub> )	انحراف معیار
D	۳/۳۱۵	۱/۷۲	۴/۹۱	۲/۲۵۶
R	۰/۹۴	۰/۵۶	۱/۳۴	۰/۵۶۶
A	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۲۸
S	۰/۹۷	۱/۱۱	۰/۸۳	۰/۱۹۸
T	۱/۴۰۵	۱/۴۷	۱/۳۴	۰/۰۹۲
I	۱/۶۵	۱/۲۶	۲/۰۴	۰/۵۵
C	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۲۸

جدول ۶- نتایج آماری تحلیل حساسیت تک پارامتر.

پارامتر	وزن نظری	وزن نظری (%)	میانگین موثر (Wmean)	بیشینه (Wmax)	کمینه (Wmin)	انحراف معیار
D	۵	۲۱/۷۴	۱۶/۲۰	۲۴/۵۹	۷/۸۱	۱۱/۸۶
R	۴	۱۷/۴۰	۱۱/۸۷	۱۷/۴۹	۶/۲۵	۷/۹۵
A	۳	۱۳/۰۴	۱۲/۰۶	۱۴/۷۵	۹/۳۷	۳/۸۰
S	۲	۸/۷۰	۷/۰۲	۱۰/۹۳	۳/۱۲	۵/۵۲
T	۱	۴/۳۸	۵/۸۶	۵/۴۷	۶/۲۵	۰/۵۵
I	۵	۲۱/۷۴	۱۸/۷۳	۲۱/۸۶	۱۵/۶۲	۴/۴۱
C	۳	۱۳/۰۴	۱۲/۰۶	۱۴/۷۵	۹/۳۷	۳/۸۰

## نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق پتانسیل آلودگی آبخوان دشت سلماس با استفاده از مدل دراستیک مبتنی بر GIS ارزیابی گردید. با توجه به نقشه نهایی آسیب‌پذیری که از هم‌پوشانی هفت لایه به‌کار رفته در مدل دراستیک به-دست آمد بیشترین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مربوط به محدوده‌ای در قسمت مرکزی منطقه مورد مطالعه با مساحت ۳۵۵/۴۶ کیلومتر مربع (۱۴/۳۶ درصد) می‌باشد این مقدار در مقایسه با دشت‌های تبریز و ملایر به ترتیب ۵۵ و ۱۰ برابر می‌باشد که بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر منطقه مطالعاتی می‌باشد. بنابراین در توسعه شهری، صنعتی و کشاورزی، بایستی به نواحی که در محدوده نامناسب از نظر پتانسیل آلودگی آبخوان قرار دارند، توجه بیشتری شود. نتایج تحلیل حساسیت‌ها

نشان داد عمق تا سطح ایستابی و محیط غیراشباع مؤثرترین عوامل برای افزایش یا کاهش پتانسیل آلودگی آبخوان می‌باشند. لذا در تعیین مقادیر پارامترهای مذکور باید دقت بیشتری اعمال گردد تا از خطای پیش‌بینی مدل کاسته شود. علی‌رغم مزایای بالای مدل دراستیک از قبیل کم بودن نسبی داده‌های لازم، سهولت به‌دست آوردن آن‌ها، هزینه کم و امکان استفاده در مناطق وسیع، بایستی معایب و محدودیت‌های آن نیز مورد توجه قرار گیرد عدم ارائه مقدار مطلق برای آسیب‌پذیری، عدم تاثیر شاخص‌های مهمی همچون ماهیت آلودگی (آسیب‌پذیری ذاتی)، ظرفیت جذب، زمان انتقال، رقیق‌سازی در شاخص نهایی آسیب‌پذیری از معایب عمده مدل دراستیک می‌باشد. لذا کاربرد مدل‌های دیگر به‌عنوان مکمل نتیجه مدل دراستیک از نظر مدیریتی ضروری به‌نظر می‌رسد.

## منابع مورد استفاده

- آزادشهرکی ف، آغاسی ع، آزادشهرکی ف و زارعی ع، ۱۳۸۹. ارزیابی پتانسیل و آنالیز حساسیت آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت هشنگرد به روش دراستیک. مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۱، شماره ۲، صفحه‌های ۶۱ تا ۷۰.
- آقازاده ن، اصغری مقدم ا و کیمیایی ا، ۱۳۸۷. ارزیابی هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه سلماس و تعیین کیفیت آن‌ها برای مصارف مختلف. مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان، جلد ۳۴، شماره ۵، صفحه‌های ۷۹ تا ۹۸.
- 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 تک پارامتری و حذفی دشت سلفچگان-نیزار. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۰، شماره ۳، صفحه‌های ۱ تا ۲۵.
- احمدی ع و آبرومند م، ۱۳۸۸. بررسی پتانسیل آلودگی دشت خاش شرق ایران، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. فصل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۵، شماره ۱، صفحه‌های ۱ تا ۱۱.

- امیر احمدی، آ. آب باریکی ز و ابراهیمی م، ۱۳۹۰. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت داورزن به روش دراستیک با استفاده از GIS. مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال ۲، شماره ۶، صفحه‌های ۵۱ تا ۶۶.
- بی‌نام، ۱۳۸۵. گزارش بیان محدود مطالعاتی سلماس، شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی.
- تبرمیه م و واعظی هیرع، ۱۳۹۳. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت تبریز. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۶، صفحه‌های ۱۱۳۷ تا ۱۱۵۱.
- چیت‌سازان م و اختری ی، ۱۳۸۵. ارزیابی پتانسیل آلودگی آبهای زیرزمینی در دشت‌های زورچری و خران با استفاده از مدل دراستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله آب و فاضلاب، دوره ۱۷، شماره ۳، صفحه‌های ۳۹ تا ۵۱.
- خدایی ک و شهسواری ع، ۱۳۸۲. پهنه بندی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی آبخوان دشت بهبهان در مقابل آلودگی با استفاده از روش دراستیک. بیست و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
- خدایی ک، شهسواری ع، اعتباری ب، ۱۳۸۵. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت جوبین به روشهای GODS و DRASTIC. مجله زمین‌شناسی ایران، دوره ۲، شماره ۴، صفحه‌های ۷۳ تا ۸۱.
- صادقی روش مح و زهتابیان غ، ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خضرآباد به روش دراستیک. مجله علمی محیط زیست، شماره ۵۵، صفحه‌های ۲۱ تا ۳۱.
- معروفی ص، سلیمانی س، قبادی م، رحیمی ق و معروفی ح، ۱۳۹۱. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملایر با استفاده از مدل‌های DRASTIC و SINTACS و SI. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۳، صفحه‌های ۱۴۱ تا ۱۷۱.
- نخعی م، امیری و و رحیمی شهربابکی م، ۱۳۹۲. ارزیابی پتانسیل آلودگی و آنالیز حساسیت آب زیرزمینی در آبخوان خاتون آباد با استفاده از مدل دراستیک مبتنی بر GIS. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۳، شماره ۸، صفحه‌های ۱ تا ۱۰.
- Al-Adamat RAN, Foster IDL and Baban SMJ, 2003. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. Applied Geography 23: 303-324.
- Aller L, Bennett T, Lehr J, Petty R and Hackett G, 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Ada, Oklahoma: U.S. and Environmental Protection Agency.
- Antonakos AK and Lambrakis NJ, 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. Journal of Hydrology 333: 288- 304.
- Babiker IS, Mohamed MA, Hiyama T and Kato K, 2005, A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. Journal of Science of the Total Environment 345: 1277-140.
- Kim YJ and Hamm SY, 1999. Assessment of the potential for ground water contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. Hydrogeology Journal 7 (2): 227-235.
- Napolitano P and Fabbri AG, 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. IAHS Pub, 235, Pp: 559-566.
- Piscopo G, 2001. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW. Department of Land and Water Conservation, Australia.
- Rahman A, 2008. A GIS Based DRASTIC model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh, India. Applied Geography 28: 32-53.
- Samey AA and 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.
- Todd D and Mays K, 2005. Groundwater Hydrology. 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley and Sons. Inc, New York.
- Zabet TA, 2002. Evaluation of aquifer vulnerability to contaminant potential using DRASTIC method. Environmental Geology 43(1): 203-208.