

## پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس با مدل سینتکس و سیستم اطلاعات جغرافیایی

شیوا عاشوری<sup>۱</sup>، شهرام شاه‌محمدی کالانق<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۸

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

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

### چکیده

ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی می‌تواند ابزاری موثر جهت اخذ تصمیم‌های مدیریتی در نظر گرفته شود. در تحقیق حاضر، از مدل سینتکس (SINTACS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس استفاده گردید. این مدل از هفت پارامتر موثر بر انتقال آلودگی به آبخوان شامل عمق سطح ایستابی، نفوذ موثر یا تغذیه خالص آبخوان، محیط غیراشباع، نوع خاک، محیط آبخوان، هدایت هیدرولیکی و شیب یا توپوگرافی تشکیل شده است. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری، سه پهنه عمده آسیب‌پذیری کم (شاخص آسیب‌پذیری ۱۱۴-۸۲)، آسیب‌پذیری متوسط (شاخص آسیب‌پذیری ۱۴۶-۱۱۴) و آسیب‌پذیری زیاد (شاخص آسیب‌پذیری ۱۷۸-۱۴۶) را نشان داد. حدود ۳۱/۴۷ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه از آسیب‌پذیری کم، حدود ۵۳/۴۲ درصد از آسیب‌پذیری متوسط و حدود ۱۵/۱۱ درصد از آسیب‌پذیری زیاد برخوردار می‌باشد. میزان تاثیرگذاری هر کدام از پارامترها در آلوده‌سازی آبخوان با تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر و روش تک پارامتری، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج هر دو تحلیل نشان داد مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری محدوده دشت سلماس محیط غیراشباع و عمق سطح ایستابی هستند.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری آبخوان، آلودگی، تحلیل حساسیت، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل سینتکس

## Salmas- Plain Aquifer Vulnerability Mapping by SINTACS and GIS Models

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

Received: May 26, 2017

Accepted: June 18, 2019

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Water Sci. and Eng., Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Dept. of Water Sci. and Eng., Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

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

### Abstract

Evaluation of groundwater resources vulnerability to pollution can be considered as an effective tool for management decisions. In this study, vulnerability of Salmas plain aquifer to pollution was assessed using SINTACS model and geographic information system (GIS). The SINTACS model consists of seven parameters including: Depth of water table, Infiltration, Unsaturated zone, Soil media, Aquifer media, Hydraulic conductivity and Topography. The vulnerability mapping showed three main zones; low groundwater vulnerability risk zone (risk indexes: 114-82), moderate groundwater vulnerability risk zone (risk indexes: 146-114) and high groundwater vulnerability risk zone (risk indexes: 178-146). The results showed that about 31.47%, 53.42% and 15.11% of the studied area had low, moderate and high vulnerability, respectively. Two tests of sensitivity analyses were carried out: map removal method and single-parameter method, for evaluating the influence of each parameter to pollute the aquifer. The results of both analyses indicated that parameters with most significant impact on the vulnerability risk zones in Salmas area were unsaturated zone and depth of water table.

**Key words:** Aquifers vulnerability, Geographic Information System, Pollution, Sensitivity analyses, SINTACS model

### مقدمه

و همکاران (۱۳۸۷) و معرف استعداد یک سیستم در تأثیرپذیری از عوامل آلوده کننده طبیعی و مصنوعی می‌باشد (لی ۲۰۰۳). آسیب‌پذیری، خصوصیتی نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است که به شاخصه‌های آبخوان، خصوصیات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژی محیط، افق خاک، تغذیه و توپوگرافی و غیره وابسته می‌باشد. اصطلاح آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به آلودگی، نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ از سوی جین مارگات ارائه شد (حسینیان و همکاران ۲۰۱۰). آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی بر اساس هدف مورد ارزیابی به دو نوع تقسیم می‌شوند: ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان (ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی) و ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آبخوان نسبت به آلاینده یا آلاینده‌های خاص (ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه). در ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی، ظرفیت آلودگی باتوجه به

آب زیرزمینی به دلیل استعداد آلودگی کمتر و همچنین ظرفیت ذخیره زیاد نسبت به آب‌های سطحی، به عنوان یک منبع مهم در منابع آب مورد توجه است (چیت-سازان و اختری ۱۳۸۵). آب‌های زیرزمینی به آب‌هایی گفته می‌شود که در لایه‌های آبدار و اشباع زیرزمین تجمع پیدا کرده است و یکی از منابع مهم تأمین آب در همه کشورهای دنیا محسوب می‌گردند و استفاده از آن‌ها در آبیاری کشاورزی و مصارف شهری و صنعتی رو به افزایش است (رضایی و همکاران ۱۳۸۹). منابع آلودگی یا آلوده‌کننده آب‌های زیرزمینی را می‌توان به دو دسته کلی، منابع آلودگی طبیعی و منابع آلودگی انسانی تقسیم نمود (محمودیان شوشتری ۱۳۹۲). آسیب‌پذیری منابع آب به معنای پتانسیل نفوذ و انتشار آلاینده‌ها در آب زیرزمینی به کار برده می‌شود (رنگزن

های 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 (رتبه دهی) با نظر کارشناسی می‌باشد (خدایی و همکاران ۱۳۸۵). مدل SINTACS جزو روش‌های شاخص هم‌پوشانی بوده و ارزیابی دقیق‌تری از آسیب‌پذیری آبخوان‌ها ارائه می‌کند (سیویتا ۱۹۹۰). کم بودن نسبی داده‌های لازم، سهولت به دست آوردن داده‌ها، دقت آماری بالا، هزینه کم، استفاده در مناطق وسیع، از مزایای این روش می‌باشد. تحقیقات زیادی با استفاده از روش سینتکس در مناطق مختلف جهان انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات الکیوسی و همکاران (۲۰۰۶) در اردن، دروئی و همکاران (۲۰۰۸) در مراکش، مجندنگ و ساراپیروم (۲۰۱۳) در تایلند، کپلج و همکاران (۲۰۱۳) در کرواسی، آصفی و همکاران (۱۳۹۳) و باقرزاده و همکاران (۱۳۸۹) در ایران اشاره کرد.

آب زیرزمینی اکثر مناطق دشت سلماس، منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی می‌باشد. از طرفی قسمت خروجی دشت منتهی به دریاچه ارومیه می‌باشد بدین جهت مطالعه کمیت و کیفیت آب زیرزمینی این دشت از نظر مدیریت منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد. لذا در این تحقیق، پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس با مدل سینتکس در محیط نرم‌افزاری ArcGIS مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت سلماس بین  $۱۳^{\circ} ۴۴'$  تا  $۱۰^{\circ} ۴۵'$  طول شرقی و  $۵۱^{\circ} ۳۷'$  تا  $۲۲^{\circ} ۳۸'$  عرض شمالی و در غرب دریاچه ارومیه واقع است (شکل ۱). وسعت آن معادل ۵۵۰ کیلومترمربع بوده و دارای

وضعیت‌های طبیعی، از جمله زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژی و آلودگی‌های ایجاد شده از طریق فعالیت‌های انسانی، بدون در نظر گرفتن آلاینده یا آلاینده‌هایی خاص مشخص می‌شود. این در حالی است که هدف ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه، ارزیابی حساسیت آبخوان نسبت به آلاینده یا گروه خاصی از آلاینده‌هاست و به اثر متقابل آلاینده با عوامل مختلف آسیب‌پذیری ذاتی بستگی دارد (ژوو و همکاران ۲۰۱۰). به طور کلی نمی‌توان گفت برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی روش مطلق وجود دارد.

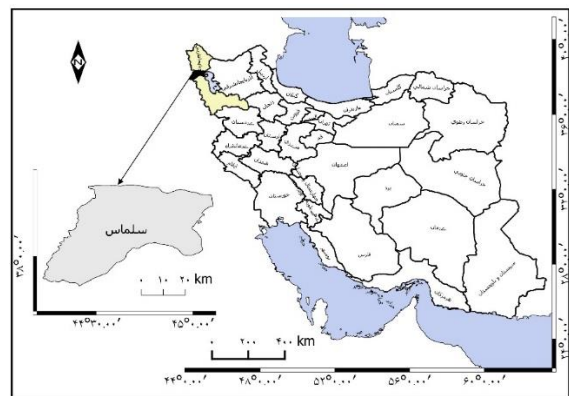
از جمله روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها می‌توان به روش‌های پردازشی، روش‌های آماری و روش‌های شاخص هم‌پوشانی اشاره کرد. روش‌های پردازشی از مدل‌های شبیه‌سازی برای تخمین حرکت آلاینده‌ها استفاده می‌شود. روش‌های آماری از روابط همبستگی بین متغیرهای مکانی و میزان آلاینده‌های موجود در آب زیرزمینی استفاده می‌شود و در روش شاخص هم‌پوشانی، اطلاعات حاصل از پارامترهای مختلف به صورت تلفیقی و به طور موازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و شاخص آسیب‌پذیری برای نقاط مختلف منطقه ارائه می‌شود (امیراحمدی و همکاران ۱۳۹۰). روش‌های شاخص هم‌پوشانی (رتبه دهی) 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 روش-

است. تغذیه طبیعی آبخوان‌ها عمدتاً از طریق رودخانه‌ها و به مقدار اندکی از نزولات جوی است. ضخامت اجزای متشکله آبخوان دشت سلماس حداکثر ۲۳۳ متر و متوسط آن بیش از صد متر است. تغذیه آبخوان از طریق رودخانه‌های شمالی، جنوبی و نیز آبی چای صورت می‌گیرد. تغذیه مستقیم از نزولات جوی عمدتاً در نواحی مخروط افکنه‌ای می‌باشد (بی‌نام ۱۳۹۱).

### مدل سینتکس

مدل سینتکس اولین بار توسط سیویتا (۱۹۹۰) به منظور ارزیابی قابلیت آسیب‌پذیری آلودگی نسبی آب‌های زیرزمینی در جنوب ایتالیا ارائه و به کار گرفته شد. این روش از مدل دراستیک آمریکایی مشتق شده است و دارای ساختمان ترکیبی است در حقیقت پارامترهای این روش همان پارامترهای روش دراستیک بوده با این تفاوت که فرآیند وزن و رتبه دهی پارامترها در روش سینتکس انعطاف بیشتری دارد. مدل سینتکس از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی عمق تا سطح ایستابی (S)<sup>۱</sup>، نفوذ مؤثر (I)<sup>۲</sup>، شرایط اشباع نشده<sup>۳</sup> (N)، محیط خاک (T)<sup>۴</sup>، خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان (A)<sup>۵</sup>، هدایت هیدرولیکی (C)<sup>۶</sup> و شیب یا توپوگرافی<sup>۷</sup> (S) تشکیل شده است. واژه SINTACS برگرفته از حرف اول پارامترها و البته به زبان ایتالیایی می‌باشد. به هر پارامتر و فاکتور براساس تاثیر و اهمیتی که در نرخ انتقال آلودگی از سطح زمین تا سطح آب زیرزمینی دارد، وزن یا نمره‌ای بین ۱ تا ۵ نسبت داده می‌شود (سیویتا ۱۹۹۴، ال کیوسی و همکاران ۲۰۰۶). اعداد بزرگتر بیانگر تاثیر بیشتر و اعداد کوچکتر نشان دهنده تاثیر و اهمیت کمتر پارامترها می‌باشد (جدول ۱). سپس نمرات

متوسط ارتفاع ۱۳۴۰ متر از سطح دریا‌های آزاد می‌باشد. حداکثر ارتفاع محدوده حدود ۳۰۰۰ متر و حداقل آن حدود ۱۲۷۰ متر می‌باشد. متوسط بارندگی کل حوضه حدود ۳۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. حداقل و حداکثر دمای آن به ترتیب ۱۴- درجه سانتی‌گراد و ۳۶+ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است (بی‌نام ۱۳۹۲).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

### ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی

آبخوان‌های آبرفتی دشت سلماس حاصل فرسایش و حمل سازندهای زمین‌شناسی اطراف است که به سمت دریاچه دارای روند نسبتاً منظمی از تغییر اندازه ذرات آبرفتی است. مخروط افکنه‌های وسیعی در دامنه ارتفاعات مشرف به دریاچه در اثر فعالیت رودخانه‌های متعدد حوضه نظیر زولاچای، نازلوچای، شهرچای، باراندوزچای، گدارچای، سیمینه رود و زربینه رود ایجاد شده است که دارای دانه‌بندی مناسب و نفوذپذیری خوبی هستند. ضخامت متوسط نهشته‌های آبرفتی در کل حوضه حدود ۱۰۰ متر برآورد می‌گردد این مقدار در دشت ارومیه بیش‌تر از ۲۰۰ متر و در آذرشهر یا مهاباد به ۳۰ متر می‌رسد (بی‌نام ۱۳۹۱). آبخوان‌های منطقه عمدتاً از نوع آزاد می‌باشد ولی در پهنه‌هایی از دشت‌ها در اثر تغییر در شرایط رسوب-گذاری تناوبی از نهشته‌های ریز دانه مانند رس و سیلت مشاهده می‌شود که با ایجاد آبخوان‌های تحت فشار شده

<sup>1</sup> Groundwater Table Depth from Surface

<sup>2</sup> Actual Infiltration

<sup>3</sup> Self-Depuration Effect Unsaturated Zone

<sup>4</sup> Overburden Type

<sup>5</sup> Hydrogeological Characteristics of the Aquifer

<sup>6</sup> Hydraulic Conductivity

<sup>7</sup> Topographical Surface Slope

### نتایج و بحث

لایه‌های اطلاعاتی مدل سینتکس و نقشه‌های رتبه-بندی

بندی

لایه عمق تا سطح ایستابی

جهت تهیه نقشه عمق سطح ایستابی از عمق ماهانه سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومترهای دشت سلماس، با بررسی صحت داده‌ها و در صورت لزوم تصحیح آن‌ها (از قبیل؛ حذف داده‌های پرت، بررسی نرمال بودن یا توزیع نرمال داده‌ها و...) استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا جدولی از اطلاعات سطح آب، شامل نام پیزومترها، موقعیت پیزومترها بر حسب UTM و عمق سطح آب در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۹۲ در محیط اکسل<sup>۱</sup> تهیه گردید. سپس این اطلاعات به فرمت قابل قبول (.xls) با نرم افزار ArcGIS تبدیل گردید و برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای ذکر شده به فایل رستر از درون‌یابی به روش کریجینگ<sup>۲</sup> استفاده شد. سپس مطابق جدول ۲، به محدوده‌های تعریف شده عمق تا سطح ایستابی توسط سیستم سینتکس طبقه‌بندی شده و نمرات بین ۱ تا ۱۰ به نواحی متفاوت آن اختصاص داده شدند سطح ایستابی عمیق‌تر، احتمال آلودگی کمتر و وزن اختصاص داده شده کوچکتر و بالعکس برای اعماق کمتر، خطر آلودگی بیشتر و وزن اختصاص داده شده بزرگتر است. به این ترتیب نقشه هم ارزش عمق تا سطح ایستابی برای تلفیق با لایه‌های دیگر تهیه گردید (شکل ۲).

به واسطه وزن‌ها اصلاح می‌گردند که وزن‌ها مربوط به شرایط محیطی ویژه یا شرایط انسان منشأ و یا هر دو می‌باشند. مدل سینتکس برای پنج شرایط خاص شامل مناطق طبیعی، مناطق با آلودگی گسترده (منابع آلودگی غیرنقطه‌ای)، مناطق با هدررفت شدید آب از شبکه‌های هیدرولیکی به سمت سفره‌های آب زیرزمینی، مناطق با پدیده‌های کارستی و مناطق با پدیده‌های شکافتگی قابل اجرا می‌باشد.

جدول ۱- وزن‌های اختصاصی پارامترهای مدل سینتکس (سیویتا ۱۹۹۴، ال کیوسی و همکاران ۲۰۰۶).

وزن	توضیح	پارامتر
۵	تعیین کننده عمقی است که آلاینده باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد هرچه سطح ایستابی عمیق‌تر باشد احتمال آلودگی کمتر است.	عمق تا سطح ایستابی
۴	مقدار آبی که از سطح زمین نفوذ و به سطح ایستابی می‌رسد؛ آب تغذیه‌ای وسیله‌ای برای انتقال آلاینده‌ها به آب زیرزمینی است.	نفوذ موثر یا تغذیه خالص
۵	منطقه فوقانی سطح ایستابی تا سطح زمین که غیراشباع بوده و نقش موثری در سرعت انتقال و میرایی آلودگی دارد.	محیط غیراشباع
۲	به بخش هوازده فوقانی منطقه غیراشباع اطلاق می‌شود و میزان آب نفوذی را کنترل می‌کند.	نوع خاک
۳	به خصوصیات مواد منطقه اشباع اطلاق می‌شود که فرآیندهای رقیق شدن آلاینده‌ها را کنترل می‌کند.	محیط آبخوان
۳	توانایی آبخوان در انتقال آب بوده و نرخ جریان مواد آلوده کننده را درون سیستم آب زیرزمینی تعیین می‌کند.	هدایت هیدرولیکی
۱	شیب سطح زمین که تعیین کننده باقی ماندن آلاینده‌ها در سطح زمین و یا ورود آن به منطقه اشباع است.	شیب یا توپوگرافی

<sup>1</sup> Excel

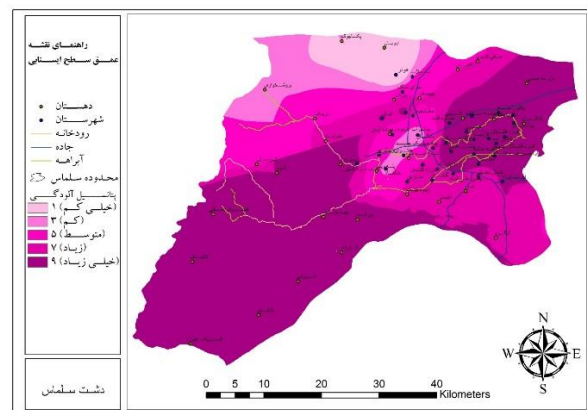
<sup>2</sup> Kriging

جدول ۲- رتبه‌های مربوط به پارامترهای مدل سینتکس در منطقه مورد مطالعه.

رتبه	محدوده پارامتر	رتبه	محدوده پارامتر
	محیط خاک		عمق تا سطح ایستابی (m)
۱۰	بافت سطحی خیلی سبک	۹	۱۹-۰/۹۴
۷	بافت سطحی سبک	۷	۱۹/۳۰-۹۴/۷۸
۳	بافت سطحی سنگین	۵	۳۰/۵۲-۷۸/۷۹
۱	بافت سطحی خیلی سنگین	۳	۵۲/۶۶-۷۹/۰۱
	محیط غیراشباع	۱	۶۶/۱۰۱-۰۱
۹	شن و ماسه همراه با اندکی رس سیلت		نفوذ موثر یا تغذیه خالص ( $\text{mm yr}^{-1}$ )
۸	شن و ماسه	۸	۲۵۰-۱۷۵
۶	رس و سیلت و شن و ماسه	۵	۱۷۵-۱۰۰
۴	رس و سیلت همراه اندکی شن و ماسه	۳	۱۰۰-۵۰
۲	رس و سیلت	۱	۵۰-۰
	هدایت هیدرولیکی ( $\text{m day}^{-1}$ )		محیط آبخوان
۱	۲۰-۰	۹	شن و ماسه و اندکی رس و سیلت
۳	۴۰-۲۰	۷	شن و ماسه
۵	۶۰-۴۰	۵	رس و سیلت و شن و ماسه
۷	۸۰-۶۰	۲	رس و سیلت همراه اندکی ماسه
۹	۸۰<	۱	رس و سیلت
			توپوگرافی (شیب %)
		۸	۱۲-۰
		۵	۲۵-۱۲
		۳	۳۸-۲۵
		۱	۵۱-۳۸

### لایه نفوذ موثر یا تغذیه خالص

لایه نفوذ موثر یا تغذیه خالص مطابق پیشنهاد پسکوپو (۲۰۰۱) از همپوشانی نقشه یا لایه‌های میزان نفوذپذیری، میزان بارندگی و شیب توپوگرافی دشت حاصل شد. به این ترتیب که 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 طبقه بندی شد. نقشه نفوذپذیری (مستخرج از نقشه کاربری



شکل ۲- نقشه رتبه‌بندی عمق سطح ایستابی دشت سلماس از نظر پتانسیل آلودگی.

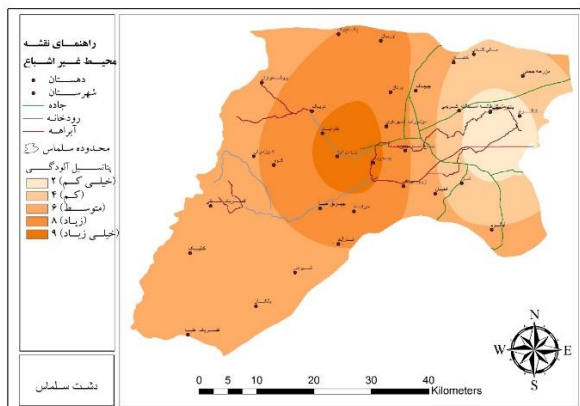
شدند به بیان دیگر، لایه و نقشه تغذیه خالص آبخوان دشت سلماس، از تلفیق و هم‌پوشانی لایه‌های (نقشه-های) درصد شیب، میزان بارندگی و میزان نفوذپذیری دشت مذکور حاصل شد.

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 به دست آوردن لایه تغذیه خالص، هر سه نقشه شیب، نفوذ پذیری و بارندگی منطقه هم‌پوشانی

جدول ۳- رتبه‌بندی لایه‌های تشکیل دهنده لایه تغذیه (بیسکوپو ۲۰۰۱).

میزان تغذیه ( $\text{cm yr}^{-1}$ )		نفوذپذیری سطح		بارندگی		شیب	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	بارش (mm)	رتبه	شیب (%)
۱۰	۱۳-۱۱	۵	زیاد	۴	> ۸۵۰	۴	< ۲
۸	۱۱-۹	۴	متوسط تا زیاد	۳	۸۵۰-۷۰۰	۳	۱۰-۲
۵	۹-۷	۳	متوسط	۲	۷۰۰-۵۰۰	۲	۳۳-۱۰
۳	۷-۵	۲	کم	۱	< ۵۰۰	۱	> ۳۳
۱	۵-۳	۱	خیلی کم				

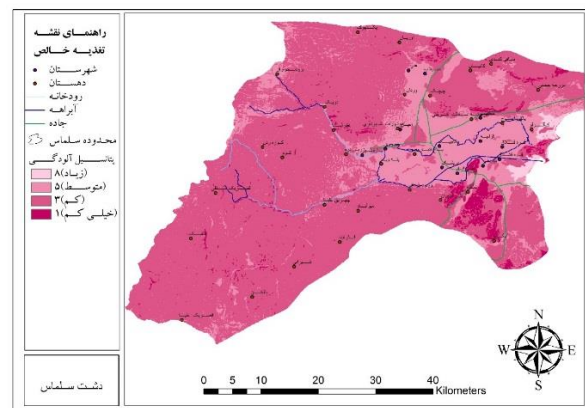
این روش، بر اساس رتبه داده شده به هر چاه به لایه رستری تبدیل گردید (شکل ۴). جنس محیط غیراشباع در قسمت‌های مرکزی دشت شن و ماسه بوده و از نفوذ پذیری نسبتاً بالایی برخوردار است بنابراین رتبه بالایی را از نظر پتانسیل آلودگی نسبت به سایر مناطق مطالعاتی به خود اختصاص داده است.



شکل ۴- نقشه رتبه‌بندی محیط غیراشباع دشت سلماس از نظر پتانسیل آلودگی.

#### لایه محیط خاک

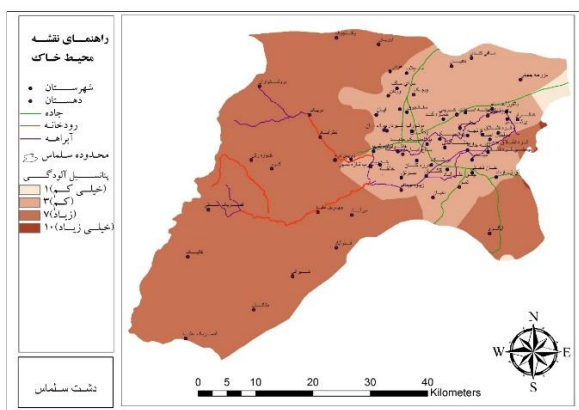
اطلاعات این لایه از نقشه خاک رقومی شده کشوری استخراج و به صورت یک لایه رستری ذخیره



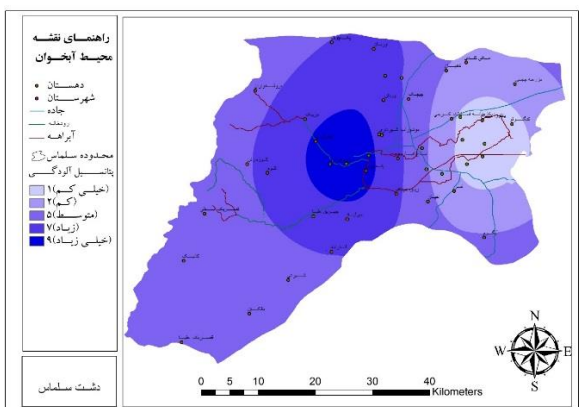
شکل ۳- نقشه رتبه‌بندی نفوذ موثر یا تغذیه خالص دشت سلماس از نظر پتانسیل آلودگی.

#### لایه محیط غیراشباع

برای تهیه لایه محیط غیراشباع از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و بهره برداری موجود در دشت استفاده گردید. بر این اساس مطابق جدول ۲ به هر یک از چاه‌ها براساس وضعیت لیتولوژیکی، ضخامت و جنس رسوبات بخش غیراشباع و میزان تأثیر آنها در انتقال آلودگی به آبخوان، رتبه‌ای اختصاص داده شد. سپس شبکه تیسن منطقه بر اساس موقعیت نسبت به مرز منطقه مورد مطالعه تهیه شد. نهایتاً لایه تهیه شده به



شکل ۵- نقشه رتبه‌بندی محیط خاک دشت سلماس از نظر پتانسیل آلودگی.



شکل ۶- نقشه رتبه‌بندی محیط آبخوان دشت سلماس از نظر پتانسیل آلودگی.

### لایه هدایت هیدرولیکی

با توجه به در دسترس نبودن داده‌های آزمایش پمپاژ، برای تهیه لایه هدایت هیدرولیکی از لاگ‌های حفاری و جنس و ترکیب آبخوان در هر لاگ و جدول‌های تعیین ضرایب نفوذپذیری (تاد و میز 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 درون‌یابی نقاط ذکر شده به فرمت رستر تبدیل شده و رتبه‌بندی بر اساس جدول ۲ نقشه-

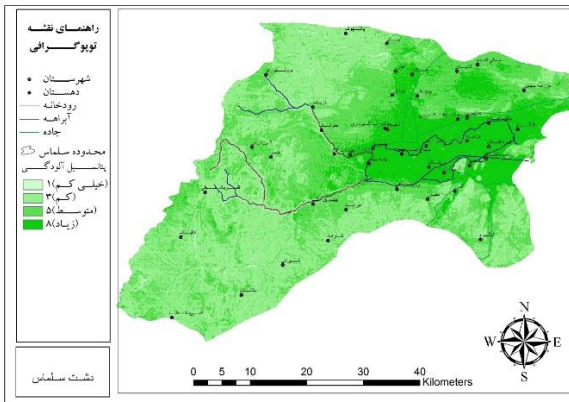
شد و با استفاده از جدول ۲ نرخ بندی گردید و نقشه رتبه‌بندی شده محیط خاک مطابق شکل ۵ حاصل گردید. منظور از محیط خاک، ناحیه بالایی منطقه غیراشباع زمین است که تا حد نفوذ ریشه گیاهان ادامه دارد و به طور متوسط عمقی در حدود ۶ فوت (۱/۸۲ متر) یا کمتر را تحت پوشش قرار می‌دهد (آلر و همکاران ۱۹۸۷). خاک و بافت آن اثر قابل توجهی بر مقدار آب نشت کرده به زمین دارد. هر چه اندازه‌ی ذرات تشکیل دهنده‌ی خاک ریزتر باشد نفوذ پذیری کمتر و پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی نیز کمتر خواهد بود (تبرمایه و واعظی‌هیر ۱۳۹۳). مطابق شکل ۵، قسمت شرقی منطقه مطالعاتی کمترین مقدار نفوذپذیری و به تبع آن کمترین پتانسیل آلودگی را دارا می‌باشد.

### لایه محیط آبخوان

برای تهیه لایه محیط آبخوان مشابه لایه محیط غیراشباع، از لاگ چاه‌های پیژومتری و بهره‌برداری موجود در منطقه استفاده گردید. بدین ترتیب که بر اساس نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر کدام از چاه‌های مذکور، مطابق جدول ۲ به هر یک رتبه‌ای بر اساس معیارهای تئوری روش سینتکس اختصاص داده شد و بر اساس مختصات جغرافیایی مربوطه، به یک لایه نقطه‌ای تبدیل شده و سپس با استفاده از الگوریتم درون‌یابی به کل منطقه تعمیم داده شد. نهایتاً از درون‌یابی این اطلاعات نقطه‌ای نقشه محیط آبخوان مطابق شکل ۴ مستخرج گردید. براساس شکل ۶، مناطق مرکزی محدوده مطالعاتی بیش‌ترین رتبه جنس محیط آبخوان را دارا بوده و نشان دهنده رسوبات شن و ماسه‌ای این منطقه می‌باشد. در مقابل مناطق شمال‌شرقی محدوده مطالعاتی کم‌ترین رتبه محیط آبخوان را به خود اختصاص داده است و نشان دهنده رسوبات رس و سیلتی می‌باشد.



پتانسیل آلودگی بیشتری نسبت به سایر مناطق را دارا می‌باشد.



شکل ۸- نقشه رتبه‌بندی توپوگرافی دشت سلماس از نظر پتانسیل آلودگی.

### شاخص سینتکس

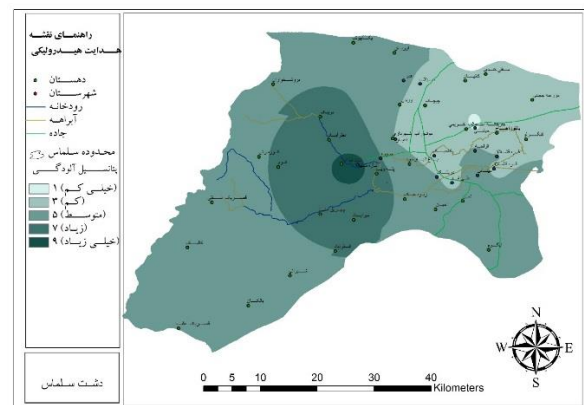
پس از رتبه‌بندی هر کدام از پارامترهای لازم جهت ارزیابی آسیب‌پذیری و تهیه هر یک از نقشه‌ها با توجه به رابطه ۱ شاخص نهایی آسیب‌پذیری سینتکس محاسبه و در محیط GIS اقدام به تهیه نقشه شاخص نهایی آسیب‌پذیری گردید.

$$I_s = \sum_{i=1}^7 (W_i \times P_i) \quad [1]$$

در رابطه فوق،  $I_s$  شاخص سینتکس و  $W_i$  وزن هر پارامتر و  $P_i$  رتبه هر پارامتر می‌باشد (سیویتا ۱۹۹۰).

کمینه مقدار برای شاخص سینتکس در منطقه مطالعاتی با استفاده از پارامترهای فوق برابر ۸۲ و بیشینه آن برابر ۱۷۸ حاصل شد در حالی‌که این مقدار در تحقیق باقرزاده و همکاران (۱۳۸۹)، ۷۴-۱۷۹ و در تحقیق معروفی و همکاران (۱۳۹۱)، ۱۷۶-۹۴ به دست آمد. این اختلاف می‌تواند به تفاوت وزن‌های اختصاص داده شده به پارامترهای هفت‌گانه در تحقیق‌های یادشده باشد. بازه شاخص سینتکس به سه رده طبقه‌بندی گردید و در جدول ۴ ارائه شد و نقشه نهایی آلودگی آبخوان نیز پس از هم‌پوشانی لایه‌ها به صورت نقشه ۹ به دست آمد. براساس جدول ۴، ۱۵/۱۱ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی دارای آسیب‌پذیری زیاد می-

ای حاصل گردید که نشان دهنده هدایت هیدرولیکی در محدوده دشت سلماس می‌باشد (شکل ۷). هدایت هیدرولیکی حرکت آلاینده و پخش آن را از نقطه نفوذ تا رسیدن به منطقه اشباع کنترل می‌نماید. بنابراین هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود. مطابق شکل ۷، قسمت‌های مرکزی دشت دارای هدایت هیدرولیکی بالاتر و در نتیجه پتانسیل آلودگی بیشتری نسبت به مناطق دیگر دشت دارد.



شکل ۷- نقشه رتبه‌بندی هدایت هیدرولیکی دشت سلماس از نظر پتانسیل آلودگی.

### لایه شیب یا توپوگرافی

برای تهیه لایه شیب ابتدا مدل رقومی ارتفاعی منطقه (DEM) از فایل‌های رقومی سازمان جغرافیایی تهیه و در محیط ArcGIS شیب منطقه محاسبه و استخراج گردید. و سپس با توجه به رتبه‌بندی مدل سینکس (جدول ۲)، نقشه لایه توپوگرافی مطابق شکل ۸ تهیه گردید. شیب سطح زمین در کنترل حرکت آلودگی و یا نگهداری آن بر روی سطح زمین تاثیر دارد. لذا در سطوح با شیب زیاد، امکان آلودگی آبخوان کم‌تر و در مقابل در سطوح کم شیب و افقی، زمان ماندگاری آلودگی بیشتر بوده لذا میزان نفوذ آلودگی نیز بیشتر خواهد بود. براین اساس مطابق شکل ۸، قسمت شرقی محدوده مطالعاتی دارای شیب کم بوده و در نتیجه

### تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت یکی از مؤلفه‌های اصلی پروژه های مدل‌سازی محسوب می‌شود، زیرا امکان ارزیابی صحت نتیجه را فراهم می‌آورد (حسینیان و همکاران ۲۰۱۰). میزان تاثیرگذاری هر کدام از پارامترهای به کار برده شده، جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس با استفاده از دو نوع تحلیل حساسیت حذف پارامتر و تحلیل حساسیت تک پارامتری مورد ارزیابی قرار گرفت.

### تحلیل حساسیت با حذف یک پارامتر یا لایه

میزان حساسیت مدل به روش حذف پارامتر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (بابیکر و همکاران ۲۰۰۵):

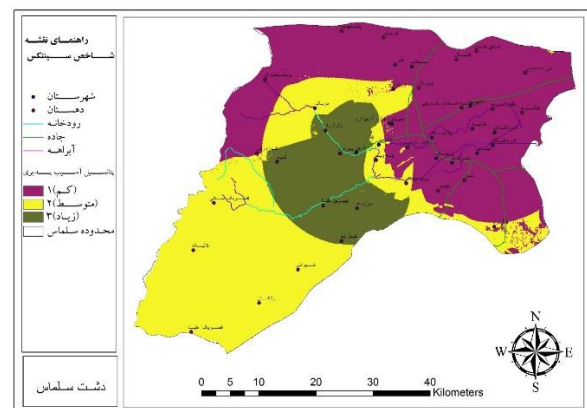
$$S = \left| \frac{V/N - V'/n}{V} \right| \times 100 \quad [2]$$

در این رابطه،  $S$  میزان حساسیت یا به عبارتی شاخص تغییر پذیری،  $V$  شاخص آسیب‌پذیری بدون حذف پارامتر،  $V'$  شاخص آسیب‌پذیری با حذف پارامتر،  $N$  و  $n$  تعداد لایه‌های مورد استفاده در محاسبه  $V$  و  $V'$  را نشان می‌دهند.  $V$  شاخص واقعی آسیب‌پذیری که با استفاده از تمام هفت پارامتر سینتکس به دست می‌آید و به عنوان شاخص آسیب‌پذیری غیرآشفته<sup>۱</sup> نیز در نظر گرفته می‌شود، درحالی که  $V'$  آسیب‌پذیری محاسبه شده با استفاده از تعداد کمتری از لایه‌ها در نتیجه حذف یک یا چند پارامتر می‌باشد و به عنوان شاخص آسیب‌پذیری آشفته<sup>۲</sup> مورد توجه قرار می‌گیرد (تبرمایه و واعظی هیر ۱۳۹۳). جدول ۵ نتایج حساسیت حذف پارامتر، با حذف یکی از لایه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۵، مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر روی شاخص

باشد این مقدار در مقایسه با دشت بهبهان با ۸/۹۰ درصد آسیب‌پذیری زیاد (باقرزاده و همکاران ۱۳۸۹) بزرگتر و در مقایسه با دشت ملایر با ۵۹/۱۰ درصد آسیب‌پذیری زیاد (معروفی و همکاران ۱۳۹۱) کوچکتر می‌باشد به عبارتی پتانسیل آلودگی و آسیب‌پذیری دشت سلماس در مقایسه با دشت‌های بهبهان و ملایر به ترتیب ۲ و ۰/۲۵ برابر می‌باشد. مطابق شکل ۹، بیشترین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی آبخوان، 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 که در محدوده نامناسب از نظر پتانسیل آلودگی آبخوان قرار دارند توجه بیشتری شود.

جدول ۴- شاخص سینتکس منطقه مطالعاتی.

وضعیت آسیب‌پذیری	شاخص	مساحت (Km <sup>2</sup> )	مساحت (%)
آسیب‌پذیری کم	۸۲-۱۱۴	۷۸۴/۹	۲۱/۴۷
آسیب‌پذیری متوسط	۱۱۴-۱۴۶	۱۳۳۲/۳۲	۵۳/۴۲
آسیب‌پذیری زیاد	۱۴۶-۱۷۸	۳۷۶/۶۷	۱۵/۱۱



شکل ۹- نقشه نهایی پتانسیل آسیب‌پذیری محدوده مطالعاتی دشت سلماس.

<sup>1</sup> Unperturbed vulnerability index

<sup>2</sup> Perturbed vulnerability index

باقرزاده و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیق خود گزارش کرده‌اند.

آسیب‌پذیری، پارامتر عمق سطح ایستابی (S) و محیط غیراشباع (N) می‌باشد و این می‌تواند به دلیل وزن تئوریک بالای این پارامترها (۵) باشد. نتیجه مشابه را

جدول ۵- نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف یک پارامتر.

انحراف معیار	کمینه (S <sub>min</sub> )	بیشینه (S <sub>max</sub> )	میانگین (S <sub>mean</sub> )	پارامتر حذفی
۳/۴۸	۱/۸۳	۶/۷۶	۴/۲۹	S
۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۸۸	۰/۵۷	I
۰/۸۹	۱/۸۳	۳/۱۰	۲/۴۶	N
۰/۲۲	۰/۷۵	۱/۰۷	۰/۹۱	T
۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۰۹	A
۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۲۹	C
۰/۱۶	۱/۷۷	۲/۰۰	۱/۸۸	S

استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید (ناپولیتانو و فابری (۱۹۹۶).

$$W = \left( \frac{P_r P_w}{V} \right) \times 100 \quad [3]$$

در این رابطه، W وزن موثر هر پارامتر، P<sub>r</sub> و P<sub>w</sub> به ترتیب مقدار رتبه و وزن هر پارامتر و V شاخص کلی آسیب‌پذیری است.

تحلیل حساسیت با یک لایه یا پارامتر

میزان حساسیت تک پارامتری برای ارزیابی تأثیر

هر یک از پارامترهای سینتکس روی شاخص آسیب‌پذیری طراحی شده است. در این روش تحلیل بر اساس جدول ۶ وزن موثر یا واقعی هر پارامتر ورودی در هر پلی‌گون با وزن تئوریک اختصاص یافته از طریق مدل تحلیلی مقایسه می‌شود. وزن مؤثر هر پلی‌گون با

جدول ۶- نتایج آماری تحلیل حساسیت تک پارامتر.

انحراف معیار	کمینه (W <sub>min</sub> )	بیشینه (W <sub>max</sub> )	میانگین موثر (W <sub>mean</sub> )	وزن تئوری (%)	وزن تئوری	پارامتر
۱۳/۵۶	۶/۰۹	۲۵/۲۸	۱۵/۶۸	۲۱/۷۴	۵	S
۹/۲۷	۴/۸۷	۱۷/۹۷	۱۱/۴۲	۱۷/۴۰	۴	I
۹/۲۵	۱۲/۱۹	۲۵/۲۸	۱۸/۷۳	۲۱/۷۴	۵	N
۶/۲۲	۲/۴۳	۱۱/۲۳	۶/۸۳	۸/۷۰	۲	T
۸/۱۳	۳/۶۵	۱۵/۱۶	۹/۴۰	۱۳/۰۴	۳	A
۸/۱۳	۳/۶۵	۱۵/۱۶	۹/۴۰	۱۳/۰۴	۳	C
۲/۳۱	۱/۲۱	۴/۴۹	۲/۸۵	۴/۳۴	۱	S

پارامترها در ارزیابی آسیب‌پذیری می‌باشند و نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف پارامتر یا لایه (جدول ۵) را نیز تایید می‌کنند. وزن موثر پارامترهای مدل

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که پارامتر عمق سطح ایستابی با میانگین وزن موثر ۱۵/۶۸ و محیط غیر اشباع با میانگین وزن موثر ۱۸/۷۳ به عنوان موثرترین

اختصاص یافته را تصحیح کرد و با انتخاب وزن‌های جدید و تصحیح شده، عملیات همپوشانی لایه‌ها را تا زمانی که انحراف معیار وزن‌های موثر و تئوریک (مطابق جدول ۶) به حداقل برسد تکرار کرد.

آسیب‌پذیری کم یا متوسط می‌باشند. بنابراین در توسعه شهری، صنعتی و کشاورزی در دشت سلماس بهتر است 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.

سینتکس در محدوده سلماس انحرافات نسبت به وزن‌های تئوریک دارد و کاملاً بر هم منطبق نیستند بنابراین می‌توان به این نکته پی برد که وزن‌ها و رتبه‌های نسبت داده شده به پارامترهای شاخص سینتکس کاملاً صحیح نبوده و می‌توان وزن‌ها و رتبه‌های

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق پتانسیل آلودگی آبخوان دشت سلماس با استفاده از مدل سینتکس مبتدی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی ارزیابی گردید. براساس شاخص آسیب‌پذیری مدل، حدود ۱۵/۱۱ درصد معادل ۳۷۶/۶۷ کیلومتر مربع مساحت دشت مورد مطالعه دارای پتانسیل آلودگی زیاد می‌باشد که مربوط به محدوده‌ای در قسمت مرکزی دشت بوده و سایر مناطق دارای

### منابع مورد استفاده

- Al Kuisi M, El-Naqa A and Hammouri N, 2006. Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area. *Jordan. Environmental Geology* 50(5): 651-667.
- Aller L, Bennet T, Leher JH, Petty RJ and Hackett G, 1987. DRASTIC: "A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydro-Geological Settings". Ada, Oklahoma U.S. and Environmental Protection Agency.
- Amirahmadi A, Abbariki Z and Ebrahimi M, 2012. Evaluation of the vulnerability of Davarzan Aquifer by DRASTIC method using GIS. *Arid Regions Geographic Studies* 2(6): 51-66. (In Persian).
- Anonymous, 2012. Basic studies of drought risk management program in the Urmia lake watershed. Iranian Department of Environment. (In Persian).
- Anonymous, 2013. Report of water balance in the Naqadeh plain. Regional Water Organization of West Azarbaijan Province. (In Persian).
- Asefi M, Radmanesh F and Heidari Z, 2014. Optimization of DRASTIC and SINTACS Models According to Geographical Information System with the Use in Analytical Hierarchy Process (AHP) (Case Study: Andimeshk Plain). *Journal of Environmental Studies* 40(1): 79-94. (In Persian).
- 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.
- Bagherzadeh S, Kalantari N, Moradzadeh M, Rahimi M, Daneshian H and Abdehvand Z, 2010. Using GIS to analyze single-parameter sensitivity of DRASTIC and SINTACS methods for assessing the vulnerability of groundwater resources in Behbahan plain. *Geomatics Conference*. May 9, 2010. Iran National Cartographic Center, Tehran, Iran.
- Chitsazan M and Akhtari Y, 2006. Evaluation the potential of groundwater pollution in Kherran and Zoweircherry plain through GIS-based DRASTIC model. *Journal of Water and Watewater* 17(3): 39-51. (In Persian).
- Civita M, 1990. Unified Legend for the Aquifer Pollution Vulnerability Maps. Pitagora Edit, Bologna.
- Civita M, 1994. Aquifer Vulnerability Maps to Pollution. Pitagora Edit, Bologna.

- Draoui M, Vias J, Andreo B, Targuisti K and El Messari JS, 2008. A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology* 54(3): 455-463.
- Hasiniaina F, Zhou J and Guoyi L, 2010. Regional assessment of groundwater vulnerability in Tamtsag basin, Mongolia using drastic model. *Journal of American Science* 6 (11): 65-78.
- Kapelj S, Loborec J and Kapelj J, 2013. Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method. *Geologia Croatica* 66(2): 119-128.
- Khodaei K, Shahsavari AA and Eatbari B, 2006. Assessment of Join aquifer vulnerability by the DRASTIC and GODS methods, *Iranian Journal of Geology* 2(4): 73-87. (In Persian).
- Lee S, 2003. Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. *Environmental Geology* 44: 654-664.
- Mahmoodian-Shoostari M, 2013. *Hydraulics of Groundwater*, Shahid Chamran University Press. 577p. (In Persian).
- Majandang J and Sarapirome S, 2013. Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. *Environmental Earth Sciences* 68(7): 2025-2039.
- Marofi S, Soleymani S, Ghobadi MH, Rahimi Gh and Marofi H, 2012. Vulnerability assessment of Malayer plain groundwater by SINTACS, DRASTIC and SI models. *Journal of Water and Soil Conservation* 19(2): 141-166. (In Persian).
- Napolitano P and Fabbri AG, 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *IAHS Pub* 235: 559-566.
- Piscopo G, 2001. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW. Department of Land and Water Conservation, Australia, <http://www.dlwc.nsw.gov.au/care/water/groundwater/reports/pdfs>.
- Rangzan K, Ziaeiian-Firoozabadi P, Mirzaei L and Alijani F, 2008. Mapping of groundwater vulnerability using DRASTIC and empirical assessment of unsaturated zone in GIS, Varamin plain. *Iranian Journal of Geology* 2(6): 21-32. (In Persian).
- Rezaei R, Maleki A, Safari M and Ghavami A, 2010. Assessment of chemical pollution of groundwater resources in downstream regions of Sanandaj landfill. *Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences* 15(3): 89-98.
- Tabarmayeh M and Vaezi Hir A, 2015. Investigation on Vulnerability of Tabriz-plain Unconfined Aquifer. *Journal of Water and Soil* 28(6): 1137-1151.
- Todd D and Mays K, 2005. *Groundwater, Hydrology*. 3rd End. John Wiley and Sons. Inc, New York.
- Zhou JG, Li F, Liu Y, Wang and Guo X, 2010. DRAV model and its application in assessing groundwater vulnerability in arid area: a case study of pore phreatic water in Tarim Basin, Xinjiang, Northwest China. *Environmental Earth Science* 60 (5): 1055-1063.