



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی گوارن

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و چهارم، شماره سوم، ۱۳۹۶

<http://jwsc.gau.ac.ir>

بهنه‌بندی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: دشت سراب)

رقیه احمدی فر^۱، * سیدمرتضی موسوی^۲ و مجید رحیم‌زادگان^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی،

^۲استادیار گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۲۹

چکیده

سابقه و هدف: حفاظت از کیفیت آب‌های زیرزمینی به دلیل کاربرد فراوان این منابع در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و شرب از اهمیت زیادی برخوردار است. رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی فرآیندی پرهزینه و زمان‌بر است. از این رو لازم است روش مناسبی برای پیشگیری از آلودگی به کار رود. یکی از این راه‌ها شناسایی نواحی مستعد در برابر آلودگی می‌باشد. هدف این مطالعه، انتخاب روش مناسب برای شناسایی مناطق حساس به ورود آلودگی به آب‌های زیرزمینی در دشت سراب است.

مواد و روش‌ها: جهت ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی در دشت سراب از دو مدل DRASTIC و SINTACS استفاده شد. در ابتدا، نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل آلودگی برای هر یک از مدل‌ها، با توجه به لایه‌های اطلاعاتی که شامل عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، شرایط خاک، توپوگرافی، اثر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان می‌باشند، در محیط نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. سپس از ترکیب پارامتر کاربری‌اراضی با نقشه‌های آسیب‌پذیری، نقشه‌های ریسک‌پذیری به دست آمد. همچنین، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای ارزیابی صحیح وزن و رتبه پارامترها و زیرپارامترهای تأثیرگذار در شاخص‌های DRATICLU و SINTACSLU استفاده شد تا شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه بر روی مدل‌ها، اعمال شود. برای مشخص کردن بهترین شاخص آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری از نظر تفکیک مناطق حساس به ورود آلودگی، ضریب همبستگی بین غلظت نیترات آب زیرزمینی و مقدار شاخص‌های محاسبه‌شده برای منطقه، با استفاده از روش رگرسیون خطی ساده انجام شد.

یافته‌ها: براساس نقشه DRASTIC، ۸۲/۶۲٪ ۴/۴۳٪ و ۱۲/۹۴٪ درصد از وسعت منطقه مورد مطالعه، به ترتیب دارای پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط، کم تا متوسط و متوسط تا زیاد است. براساس نقشه SINTACS، ۷۶/۴۸٪ درصد منطقه با پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد و ۲۳/۵۲٪ درصد با آسیب‌پذیری کم ارزیابی شد. طبق نتایج شاخص DRASTICLU، ۲۴/۱۰٪ درصد از وسعت منطقه مورد مطالعه دارای ریسک‌پذیری کم، ۴۸/۹۷٪ درصد دارای ریسک‌پذیری متوسط و ۲۴/۸۶٪ درصد دارای ریسک‌پذیری زیاد است. در طبقه‌بندی نقشه SINTACSLU به ترتیب

* مسئول مکاتبه: m_mousavi@kntu.ac.ir

۵۵/۳۵ و ۴۰/۸۲ درصد از اراضی دشت سراب در محدوده ریسک‌پذیری متوسط و زیاد قرار گرفت. همچنین طبق نتایج شاخص AHP-DRASTICLU به‌ترتیب ۷/۸۱، ۵۰/۸۶، ۳۷/۵۲، ۳۷/۷۴ درصد از منطقه مورد مطالعه، با ریسک‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط و زیاد ارزیابی شد و شاخص AHP-SINTACSLU نتایجی مشابه شاخص AHP-DRASTICLU را نشان داد.

نتیجه‌گیری: به‌منظور انتخاب بهترین شاخص آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری از نظر تفکیک منطقه حساس به ورود آلودگی، ارتباط بین غلظت نترات آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه و مقدار هر کدام از شاخص‌ها محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که در بین شاخص‌های آسیب‌پذیری، شاخص DRASTIC با ضریب تبیین ۰/۴۰ و در بین شاخص‌های ریسک‌پذیری، شاخص AHP-DRASTILU با ضریب تبیین ۰/۵۶، دارای R^2 بالاتری نسبت به بقیه شاخص‌ها هستند؛ بنابراین برای ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری آبخوان دشت سراب، معتبرتر و دقیق‌تر هستند.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری، دشت سراب، DRASTIC، SINTACS، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به دلایل متعدد از جمله استعداد آلودگی کم‌تر و همچنین ظرفیت ذخیره زیاد نسبت به آب‌های سطحی به‌عنوان یک منبع مهم منابع آب در سراسر جهان مورد توجه می‌باشند (۳۱). در کشورهای نیمه‌خشکی مانند ایران که آب‌زیرزمینی عمده‌ترین منبع قابل‌اطمینان برای مصارف انسانی و کشاورزی و صنعتی به‌شمار می‌رود، مصرف بیش از حد آن، به‌علت رشد پیوسته جمعیت و صنعتی شدن، کیفیت آبخوان‌ها را تهدید می‌کند و موجب آسیب‌پذیری آبخوان می‌شود (۴). عبارت آسیب‌پذیری در هیدروژئولوژی، اولین بار توسط مارگات در سال ۱۹۷۰ به‌کار رفت؛ وی آسیب‌پذیری آبخوان را امکان نفوذ و پخش آلودگی از سطح زمین به سطح آب مخازن طبیعی در شرایط طبیعی تعریف کرد (۱۸). کمیته ملی تحقیق آمریکا^۱ در سال ۱۹۹۳ آسیب‌پذیری آب زیرزمینی را تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از تولید در برخی محل‌ها در سطح زمین تعریف نمود (۲۱).

آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را می‌توان به دو گروه آسیب‌پذیری ذاتی^۲ و آسیب‌پذیری ویژه^۳ تقسیم‌بندی کرد. در آسیب‌پذیری ذاتی، حساسیت آبخوان به عوامل طبیعی مدنظر می‌باشد و برای محاسبه آن از خصوصیات زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه، بدون توجه به نوع آلاینده، استفاده می‌شود (۷ و ۳۴). آسیب‌پذیری ویژه، آسیب‌پذیری ذاتی را همراه با احتمال قرار گرفتن آب‌های زیرزمینی در معرض نفوذ آلاینده‌های مشخص مورد بررسی قرار می‌دهد (۳۴). رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است و اغلب زمانی آلودگی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آبخوان بسیار دشوار می‌باشد. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و مدیریت کاربری اراضی است (۱۲). برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، سه گروه روش‌های پردازشی، آماری و شاخص و هم‌پوشانی^۴ ارائه شده است. روش‌های پردازشی از مدل‌های شبیه‌سازی برای

- 2- Intrinsic Vulnerability
- 3- Specific Vulnerability
- 4- Overlay and Index methods

- 1- National Research Council (United States)

مطالعات بررسی شده، از میان روش‌های موجود، در این پژوهش روش‌های DRATIC و SINTACS به دلیل دقت و کارایی بالاتر برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آبخوان دشت سراب انتخاب شدند. همچنین از مزیت‌های اصلی مدل‌های DRATIC و SINTACS، انجام ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از تعداد لایه‌های اطلاعاتی متعدد است؛ زیرا عقیده بر این است که در این حالت اثر خطاها و عدم قطعیت‌های موجود در یک پارامتر منفرد در خروجی نهایی محدود می‌شود (۱۹). پس از تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری، با اضافه کردن پارامتر کاربری زمین به آن، نقشه‌های ریسک‌پذیری تهیه گردید. به منظور اعمال شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه در نقشه‌های ریسک‌پذیری، وزن‌ها و رتبه‌های شاخص‌های ریسک‌پذیری با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۳ تغییر داده شد و ریسک‌پذیری منطقه با شاخص‌های جدید تهیه گردید. برای صحت‌سنجی مدل‌ها از غلظت نترات چاه‌های کشاورزی موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده و شاخص مناسب انتخاب شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: در این پژوهش، منطقه مورد مطالعه، آبخوان دشت سراب واقع در استان آذربایجان شرقی می‌باشد. آب‌زیرزمینی دشت سراب در تأمین آب شرب و کشاورزی شهرستان سراب مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به توسعه فعالیت‌های کشاورزی در منطقه، استفاده از انواع کودهای شیمیایی و حیوانی گسترش می‌یابد، بنابراین احتمال آلودگی آبخوان این دشت به منابع آلاینده

تخمین حرکت آلاینده‌ها استفاده می‌کنند. روش‌های آماری از روابط همبستگی بین متغیرهای مکانی و میزان آلاینده‌های موجود در آب زیرزمینی استفاده می‌کنند (۳۱). روش‌های هم‌پوشانی بر پایه تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده‌اند و برای تعیین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی کاملاً مؤثر می‌باشند. با توجه به توانایی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) در سازماندهی حجم عظیم اطلاعات، تلفیق و آنالیز لایه‌های مختلف، از آن برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان استفاده می‌شود (۲۹). در روش‌های هم‌پوشانی، آسیب‌پذیری آبخوان براساس انتقال آلودگی از سطح زمین به لایه آبدار برآورد می‌شود. این روش‌ها در به‌کارگیری نوع و تعداد پارامترها باهم تفاوت دارند و در نهایت منجر به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی می‌گردند (۱۷). از مهم‌ترین روش‌های هم‌پوشانی می‌توان به DRATIC^(۳)، SINTACS^(۶)، GOD^(۱۲)، SI^(۲۵)، AVI^(۳۰)، EPIK^(۸) و COP^(۳۳) اشاره نمود. روش‌های هم‌پوشانی، مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی هستند؛ زیرا نسبت به سایر روش‌ها ارزان هستند، به‌طور مستقیم به هدف می‌رسند، داده‌های مورد استفاده آن‌ها در دسترس یا قابل تخمین می‌باشند و نتایج نهایی آن‌ها به آسانی قابل توصیف است و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مناسب هستند (۱۸).

در خصوص آسیب‌پذیری و آلودگی منابع آب زیرزمینی با روش‌های هم‌پوشانی پژوهش‌هایی انجام شده که هر کدام از نقطه‌نظرهای مختلفی به بررسی موضوع پرداخته‌اند (۱، ۲، ۴، ۵، ۱۴، ۱۹، ۲۸ و ۲۹).

هدف اصلی این پژوهش، تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری و ریسک^۲ آبخوان دشت سراب است. با توجه به

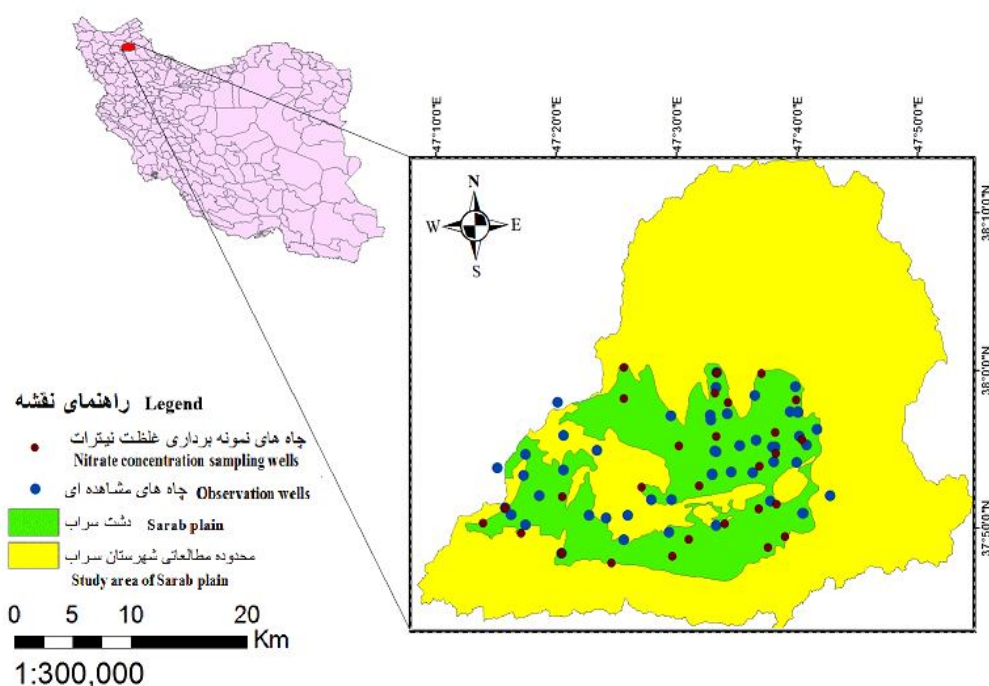
1- Geographic information system

2- Risk

3- Analytical Hierarchy process

آجی‌چای از شرق به غرب جریان یافته و به دریاچه ارومیه می‌ریزند (شکل ۱). میانگین بارندگی درازمدت سالانه در دشت سراب ۳۰۱/۶ میلی‌متر و نوع اقلیم دشت بر اساس دسته‌بندی اقلیمی آمبرژه، نیمه‌خشک سرد برآورد شده است. با توجه به نتایج مطالعات انجام‌شده، مقدار مصرف آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی در منطقه ۲۹۰/۲ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد که از این مقدار ۱۴۵/۲ میلیون مترمکعب در سال از منابع آب زیرزمینی و ۱۴۵ میلیون مترمکعب از منابع آب سطحی برداشت می‌شود (۱۰). دشت سراب دارای ۷۶۱۴۲ هکتار اراضی باغی، آبی و دیم می‌باشد (۹).

بسیار زیاد می‌باشد. محدوده مطالعاتی سراب که همان حوضه آبریز دشت سراب می‌باشد ۲۲۴۲ کیلومترمربع وسعت دارد که ۱۱۴۷ کیلومترمربع آن مناطق کوهستانی و ۱۰۹۵ کیلومترمربع آن مربوط به دشت‌های منطقه سراب می‌باشد. دشت سراب با مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 12' - 37^{\circ} 44'$ عرض شمالی و $47^{\circ} 54' - 47^{\circ} 15'$ طول شرقی در دامنه جنوبی توده آتشفشان سبلان و دامنه شمالی رشته‌کوه بزقوش قرار گرفته است. منابع آب سطحی دشت را رودخانه‌های بیوک‌چای، تاجیارچای، رازلیق‌چای و وانق‌چای تشکیل می‌دهند که از ارتفاعات اطراف سرچشمه می‌گیرند و سپس به هم پیوسته و با نام



شکل ۱- نقشه موقعیت دشت سراب (برگرفته از ۱۰).

Figure 1. The location map of Sarab plain (Adapted from 10).

(DEM) با توان تفکیک ۳۰ متر، داده‌های ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در منطقه، نقشه خاک‌شناسی دشت سراب، لاگ پیزومترها و لاگ

داده‌های مورد استفاده: داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز در این پژوهش برای تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری، شامل داده‌های مدل رقومی ارتفاعی^۱

1- Digital Elevation Model

به بازه‌های هر یک از مشخصه‌های هیدرولوژیک نیز رتبه‌ای^{۱۲} از یک تا ده براساس تأثیر آن‌ها بر آسیب‌پذیری، اختصاص داده می‌شود (۲۸). برای محاسبه شاخص DRASTIC از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$DRASRIC\ Index = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

که در آن، حروف D, R, A, S, T, I, C و معرف پارامترهای تأثیرگذار در شاخص DRASTIC بوده و اندیس‌های T و W به ترتیب معرف رتبه و وزن هر کدام از پارامترها می‌باشند. با تلفیق پارامترها در GIS بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۲، نتیجه حاصل، لایه رستری خواهد بود که بر اساس جدول ۳ طبقه‌بندی می‌شود. مشخصه‌های شاخص DRASTIC عبارتند از:

عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی: عمق آب زیرزمینی به فاصله بین سطح زمین و بالای ناحیه اشباع اطلاق می‌شود و یکی از عوامل مهم در کنترل توانایی آلاینده‌ها برای رسیدن به آبخوان است. در واقع این مشخصه تعیین‌کننده عمقی است که آلاینده باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد و هرچه این عمق زیادتر باشد زمان بیشتری طول می‌کشد تا مواد آلاینده به آب زیرزمینی برسند (۳).

در این مطالعه لایه رستری عمق سطح ایستابی، با درون‌یابی نقاط حاصل از میانگین عمق سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای منطقه در یک دوره ۱۴ ساله (از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۳۹۳)، با ابزار Arc Hydro GW در نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد و مطابق جدول ۲ کلاس‌بندی و ارزش‌گذاری شد. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است.

حفری چاه‌های اکتشافی، ضریب انتقال‌پذیری^۱، ضخامت اشباع آبخوان دشت سراب، نقشه کاربری اراضی^۲، آمار سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومترها و داده‌های نترات چاه‌های دشت سراب می‌باشند که همه داده‌ها از قسمت مطالعات آب زیرزمینی شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی تهیه شدند.

شاخص DRASTIC: از کاربردی‌ترین روش‌های شاخص هم‌پوشانی، روش DRASTIC می‌باشد که اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا^۳ جهت تعیین پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است (۳). این مدل که برای اغلب شرایط آب و هوایی در نقاط مختلف جهان نتایج قابل‌قبولی ارائه می‌دهد، بر پایه مفهوم وضعیت هیدروژئولوژی استوار است که توصیف‌کننده ترکیبی از تمام عوامل زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی می‌باشد (۲۸). مدل DRASTIC، شامل ۷ پارامتر عمق آب زیرزمینی^۴ (D)، تغذیه خالص^۵ (R)، محیط آبخوان^۶ (A)، محیط خاک^۷ (S)، توپوگرافی^۸ (T)، اثر ناحیه غیراشباع^۹ (I) و هدایت هیدرولیکی آبخوان^{۱۰} (C) می‌باشد (۳). برای نشان دادن اهمیت نسبی هر کدام از پارامترهای به‌کار رفته در مدل، وزنی^{۱۱} اختصاص داده می‌شود. این وزن‌ها با توجه به تأثیر هر کدام از پارامترها در انتقال آلودگی به سیستم آب زیرزمینی، مقادیری بین ۱ تا ۵ می‌باشند. در این مدل

- 1- Transmissivity
- 2- Land Use
- 3- United States Environmental Protection Agency (USEPA)
- 4- Depth to water
- 5- Net Recharge
- 6- Aquifer media
- 7- Soil media
- 8- Topography
- 9- Impact of vadose zone
- 10- Hydraulic Conductivity
- 11- Weight

12- Rating

جهت محاسبه لایه رستری تغذیه خالص در نرم‌افزار ArcGIS، از مدل رقومی ارتفاعی منطقه، نقشه شیب منطقه تهیه و با استفاده از معیارهای جدول ۱ طبقه‌بندی گردید. نقشه بارندگی، از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در منطقه و نفوذپذیری از نقشه خاک‌شناسی منطقه مورد مطالعه تهیه و طبق معیارهای جدول ۱ ارزش‌گذاری شدند. در نهایت نقشه‌های رستری هر سه پارامتر مطابق رابطه ۲ هم‌پوشانی شدند و لایه تغذیه خالص مطابق جدول ۱ رتبه‌بندی شد.

تغذیه خالص: تغذیه خالص نشان‌دهنده مقدار آبی است که از سطح زمین وارد آبخوان می‌شود. هرچه حجم تغذیه خالص بیشتر باشد امکان آلودگی در آبخوان نیز بیشتر است. پیسکوپو (۲۰۰۱)، رتبه تغذیه خالص را براساس رتبه میزان بارندگی، رتبه شیب و رتبه نفوذپذیری خاک منطقه محاسبه کرد (۲۳). معادله پیسکوپو به صورت رابطه ۲ است:

$$(۲) \quad \text{رتبه درصد شیب منطقه} = \text{رتبه تغذیه خالص} + \text{رتبه نفوذپذیری خاک} + \text{رتبه میزان بارندگی}$$

جدول ۱- رتبه‌دهی تغذیه خالص مؤثر در شاخص DRASTIC (برگرفته از ۲۳).

Table 1. The rating of effective net recharge in DRASTIC Index (Adapted from 23).

تغذیه خالص Net recharge		نفوذپذیری خاک Soil permeability		بارندگی Rainfall		شیب slope	
رتبه Rating	محدوده Range	رتبه Rating	محدوده Range	رتبه Rating	بارش (میلی‌متر) Rainfall (mm)	رتبه Rating	شیب (درصد) Slope (%)
10	11-13	5	زیاد High	4	>850	4	<2
8	9-11	4	متوسط تا زیاد Moderately high	3	700-850	3	2-10
5	7-9	3	متوسط Moderate	2	500-700	2	10-33
3	5-7	2	کم Slow	1	<500	1	>33
1	3-5	1	خیلی کم Very slow				

جریان حاکم بر سیستم آب زیرزمینی در آبخوان را مشخص می‌کند (۱۷).

برای تعیین نوع و جنس محیط آبخوان از داده‌های لاگ پیرومترها و لاگ حفاری چاه‌های اکتشافی تهیه شده توسط آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی در منطقه مطالعاتی دشت سراب استفاده شد. جهت

محیط آبخوان: محیط آبخوان، شامل فضاهاى خالی و شکستگی‌هایی است که آب را نگه داشته و عبور می‌دهند؛ بنابراین مواد تشکیل‌دهنده آبخوان بر جریان درون آن تأثیر می‌گذارد. این مسیر، جریان حرکت آلاینده‌ها را از طریق محیط آبخوان تعیین می‌کند. به عبارتی محیط آبخوان و مواد تشکیل‌دهنده آن، روند

منطقه محاسبه و با توجه به جدول ۲ ارزش گذاری شد.

محیط غیراشباع: به ناحیه بین سطح زمین و سطح آبخوان اصطلاحاً ناحیه غیراشباع گفته می‌شود (۳). در بخش غیراشباع، جنس منطقه غیراشباع و قدرت جذب و نگه‌دارندگی مواد آلاینده و بافت مواد زمین‌شناسی موجود در آن، مدنظر قرار می‌گیرند. ذرات ریز مانند رس قدرت جذب و نگه‌دارندگی بیشتری نسبت به ذرات درشت داشته و مانع حرکت آلاینده‌ها به سمت آب‌های زیرزمینی شده و از استعداد آلودگی آبخوان می‌کاهند (۳۱).

در این پژوهش برای تهیه این لایه از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی استفاده گردید و با توجه به ضخامت و جنس لایه‌های محیط غیراشباع در لاگ چاه‌ها، رتبه‌هایی مطابق جدول ۲ اختصاص داده شد و براساس مختصات جغرافیایی لاگ‌ها لایه نقطه‌ای در GIS تهیه گردید که با استفاده از الگوریتم درون‌یابی، به کل منطقه تعمیم داده شد.

هدایت هیدرولیکی: هدایت هیدرولیکی، سهولت حرکت آب زیرزمینی در محیط آبخوان را نشان می‌دهد؛ بنابراین هرچه هدایت هیدرولیکی بالا باشد آلاینده‌ها در آبخوان به راحتی انتقال پیدا می‌کنند (۳۲).

برای به‌دست آوردن لایه رستری هدایت هیدرولیکی، ابتدا لایه‌های رستری ضریب انتقال‌پذیری و لایه ضخامت اشباع آبخوان محاسبه گردید و سپس با تقسیم ضریب انتقال‌پذیری بر ضخامت آبخوان در GIS، نقشه هدایت هیدرولیکی به‌دست آمد (۲۷). در نهایت با توجه به جدول ۲، لایه هدایت هیدرولیکی رتبه‌بندی شد.

برای محاسبه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان، با توجه به این‌که داده‌های مورد استفاده در مدل DRASTIC

تهیه لایه رستری محیط آبخوان بر حسب نسبت مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در هر کدام از لاگ‌ها با استفاده از جدول ۲ ارزش عددی بین ۱ تا ۱۰ اختصاص یافت و سپس با استفاده از الگوریتم درون‌یابی در GIS به کل منطقه تعمیم داده شد. در نهایت، بعد از درون‌یابی این اطلاعات نقطه‌ای، نقشه محیط آبخوان رتبه‌بندی گردید.

محیط خاک: خاک، لایه فوقانی پوسته زمین است که از فعل‌وانفعالات پیچیده‌ای که بین ماده اولیه، آب، هوا و موجودات زنده اتفاق افتاده، تشکیل شده است. در اکثر کشورهای با آب و هوای معتدل، خاک تا عمق ۲ متر ادامه دارد. پتانسیل آلاینده‌ها و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در حرکت آلاینده‌ها داخل پروفیل خاک مؤثر است؛ بنابراین می‌توان گفت که ویژگی‌های خاک بر نرخ نفوذ و جذب و میرایی آلاینده‌ها اثر دارد. هرچه میزان مواد ریزدانه مانند سیلت و رس در خاک بیشتر باشد، نفوذپذیری خاک کاهش یافته و برعکس، مواد دانه درشت‌تر مانند شن، نفوذپذیری خاک و در نتیجه توانایی انتقال آلاینده‌ها را به سیستم آب زیرزمینی افزایش می‌دهند (۲۲).

برای به‌دست آوردن لایه رستری محیط خاک، از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شده و پس از تهیه لایه خاک در محیط GIS، با توجه به جدول ۲ رتبه‌دهی انجام شد.

توپوگرافی: توپوگرافی به تغییرات شیب سطح زمین اشاره دارد که بر حرکت و نفوذ آب‌های سطحی و آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد. در مناطق با شیب کم به دلیل حضور طولانی‌مدت رواناب بر روی سطح زمین، نفوذپذیری بیشتر است؛ بنابراین پتانسیل آلودگی نیز در آبخوان این مناطق زیادتر است (۱۷).

برای تهیه لایه رستری توپوگرافی، از روی نقشه DEM با توان تفکیک ۳۰ متر منطقه، درصد شیب

رتبه خاصی بودند، برای ترکیب و تلفیق داده‌ها بر اساس رابطه ۱، از ابزار محاسبات رستری تابع هم‌پوشانی وزنی استفاده شد و در نهایت نقشه آسیب‌پذیری دشت، مطابق جدول ۳ کلاس‌بندی شد.

همگی به قالب رستری تهیه شدند، در نرم‌افزار GIS به‌منظور ترکیب لایه‌های رستری از تابع هم‌پوشانی استفاده شد. این تابع به دو صورت ریاضی و وزنی عمل ترکیب داده‌ها را انجام می‌دهد. با توجه به این‌که هر یک از لایه‌های موردنظر در این مدل دارای وزن و

جدول ۲- رتبه‌بندی و وزندهی پارامترهای مؤثر در شاخص DRASTIC (برگرفته از ۳، ۱۱ و ۲۹).

Table 2. The rating and weighting of effective parameters in DRASTIC Index (Adapted from 3, 11 and 29).

مقدار value		زیرپارامتر Sub parameter	پارامتر Parameter	مقدار value		زیرپارامتر Sub parameter	پارامتر Parameter
رتبه Rating	وزن Weight			رتبه Rating	وزن Weigh		
10	1	0-2	توپوگرافی Topography	10	5	0-1.5	عمق آب زیرزمینی (متر) Groundwater depth (m)
9		2-6		9		1.5-4.6	
5		6-12		7		4.6-9.1	
3		12-18		5		9.1-15.2	
1		>18		2		22.8-304	
			1	>30.4			
9	5	شن ماسه‌دار Sandy gravel	اثر محیط غیراشباع Impact of vadose zone	9	3	شن ماسه‌دار Sandy gravel	محیط آبخوان Aquifer media
8		ماسه Sand		8		ماسه بار مقدار کمی Sand	
6		ماسه، سیلت و رس Sand, silt and clay		7		سیلت و رس Silt and clay	
5		سیلت ماسه‌دار Sandy silt		6		سیلت و رس Silt and clay	
3		سیلت Silt					
10	3	>82	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) Hydraulic Conductivity (m/day)	9	2	ماسه Sand	محیط خاک Soil media
8		41-82		6		لوم ماسه‌ای Sandy Loam	
6		28.7-41		5		لوم Loam	
2		4.1-12.3		4		لوم سیلتی Silty Loam	
1		0.04-4.1		3		لوم رس‌دار Clay Loam	

پارامترهای روش DRASTIC می‌باشد با این تفاوت که رتبه‌دهی پارامترهای آن از انعطاف بیشتری برخوردار است (۱۵). براساس نوع و حساسیت منطقه، ضرایب مختلفی برای هر کدام از پارامترهای مؤثر در این شاخص در نظر گرفته می‌شود، مطابق

شاخص SINTACS: این روش، اولین بار توسط سویتا و همکاران (۱۹۹۰) برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان در جنوب ایتالیا به‌کار برده شد (۶). در حقیقت مدل SINTACS توسعه‌یافته مدل DRASTIC است و پارامترهای این روش همان

SINTACS بعد از تهیه لایه‌های رستری پارامترها، با توجه به این‌که هر یک از لایه‌های این مدل همانند مدل DRASTIC دارای وزن و رتبه خاصی بودند، برای ترکیب و تلفیق داده‌ها بر اساس رابطه ۳، از ابزار محاسبات رستری تابع هم پوشانی وزنی در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد و در نهایت نقشه آسیب‌پذیری مطابق جدول ۳ طبقه‌بندی شد.

ریسک‌پذیری آبخوان: در هر ناحیه، نوع استفاده از زمین متغیر می‌باشد و تأثیر آلاینده‌ها بر اساس نوع کاربری در قسمت‌های مختلف متفاوت است. ترکیب نوع کاربری اراضی با میزان آسیب‌پذیری هر مکان، میزان آسیب‌پذیری اصلاح‌شده را به‌وجود می‌آورد (۲۴). در اصطلاح، میزان آسیب‌پذیری اصلاح‌شده را میزان ریسک می‌گویند. تعیین میزان ریسک یعنی مشخص کردن این موضوع که ورود آلودگی در منطقه با توجه به نوع کاربری زمین به چه میزان زیان‌بار است (۱۸). نقشه ریسک طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود که در این رابطه MDI میزان ریسک یا آسیب‌پذیری اصلاح‌شده، DI میزان آسیب‌پذیری، L_r نرخ مربوط به نوع کاربری و L_w وزن مربوط به کاربری اراضی است (۲۴).

$$MDI = DI + L_r \cdot L_w \quad (4)$$

برای پهنه‌بندی ریسک‌پذیری در یک آبخوان نیاز به تعیین کاربری اراضی در محدوده آبخوان می‌باشد (۱۸). به‌منظور تهیه لایه کاربری اراضی، از نقشه رستری کاربری اراضی کل استان آذربایجان شرقی مربوط به سال ۱۳۹۲ که از طریق تصاویر ماهواره‌ای توسط شرکت آب منطقه‌ای استان تهیه شده بود، استفاده شد. برای وزن‌دهی و رتبه‌دهی پارامتر کاربری اراضی از جدول ۵ استفاده شد و سپس با ترکیب لایه

جدول ۴، وزن‌دهی در هر کدام از مناطق متفاوت است (۲). برای استفاده از این شاخص لازم است که ابتدا وضعیت آب زیرزمینی و شرایط آن‌ها مشخص گردد و سپس به هر قسمت، وزن مربوطه اختصاص داده شود. این مدل دارای هفت پارامتر هیدرولوژیکی عمق سطح ایستابی^۱ (S)، نفوذ مؤثر^۲ (I)، اثر ناحیه غیراشباع^۳ (N)، پوشش سطحی خاک^۴ (T)، خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C) و شیب توپوگرافی^۵ (S) می‌باشد. آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص SINTACS از رابطه ۳ محاسبه می‌شود که در این رابطه P_i رتبه و W_i وزن نسبی پارامترها است. بعد از تلفیق پارامترها مطابق رابطه ۳ و تهیه لایه رستری آسیب‌پذیری با شاخص SINTACS در محیط GIS، محدوده آسیب‌پذیری با استفاده از جدول ۳ طبقه‌بندی می‌شود.

$$SINTACS\ Index = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i \quad (3)$$

مشخصه‌های شاخص SINTACS: بر اساس حساسیت منطقه و همچنین کمبود اطلاعات اولیه جهت تفکیک کامل محدوده مورد مطالعه از نظر وضعیت آب‌های زیرزمینی، شرایط نرمال شاخص SINTACS برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه به‌کار رفت. برای تهیه لایه‌های مدل SINTACS، مانند مدل DRASTIC عمل کرده و برای رتبه‌دهی زیرپارامترهای هر کدام از پارامترها بر اساس تأثیر و اهمیتی که در میزان آسیب‌پذیری دارند، رتبه‌ای بین ۰ تا ۱۰ اختصاص یافت (۲) و وزن‌دهی پارامترها طبق شرایط نرمال جدول ۴ انجام شد. برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان با روش

- 1- Water table depth
- 2- Effective infiltration
- 3- Unsaturated condition
- 4- Soil media
- 5- Topographic slope

کاربری اراضی با شاخص‌های آسیب‌پذیری DRASTIC و SINTACS طبق رابطه ۴، نقشه ریسک‌پذیری آبخوان با نام DRASTICLU و SINTACSLU در محیط GIS حاصل و مطابق جدول ۶، کلاس‌بندی شد.

جدول ۳- رتبه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و SINTACS (برگرفته از ۳ و ۱۳).

Table 3. Vulnerability potential ratings in DRASTIC and SINTACS Indexes (Adapted from 3 and 13).

محدوده (شاخص SINTACS) Ranges (SINTACS index)	محدوده (شاخص DRASTIC) Ranges (DRASTIC index)	کلاس‌بندی آسیب‌پذیری Vulnerability classification
<80	<79	خیلی کم Very low
80-105	80-99	کم Low
-	100-119	کم تا متوسط Moderately low
105-140	120-139	متوسط Moderate
140-186	140-159	متوسط تا زیاد Moderately high
186-210	160-179	زیاد High
>210	180-199	خیلی زیاد Very high
-	>200	کاملاً مستعد Extremely high

جدول ۴- وزن‌دهی شاخص SINTACS برای حالات مختلف (برگرفته از ۱۶).

Table 4. Weighting system in SINTACS Index (Adapted from 16).

آلودگی وسیع Severe	گسل و ترک‌خوردگی Fissured	زهکشی و نفوذ Seepage	کارستی Karst	نرمال Normal	پارامتر Parameter
5	3	4	2	5	عمق سطح ایستابی (متر) Water table depth (m)
5	3	4	5	4	نفوذ مؤثر (میلی‌متر در سال) effective infiltration (mm/year)
4	3	4	1	5	محیط غیراشباع unsaturated condition
5	4	2	3	4	پوشش سطحی خاک soil media
3	4	5	5	3	خصوصیات آبخوان Aquifer characteristics
2	5	5	5	3	هدایت هیدرولیکی Hydraulic Conductivity
2	4	2	5	2	شیب توپوگرافی Topographic slope

جدول ۵- رتبه‌بندی و وزن‌دهی پارامتر کاربری اراضی (برگرفته از ۲۹).

Table 5. The rating and weighting of Land use parameter (Adapted from 29).

مقدار value		زیرپارامتر Sub parameter	پارامتر Parameter
رتبه Rating	وزن Weight		
10		باغ Garden	
8		زمین کشاورزی Agricultural field	
7	5	زمین مسکونی Settlements	کاربری زمین Land use
5		مرتع Grassland	
3		جنگل Forest	

جدول ۶- کلاس‌بندی ریسک‌پذیری آبخوان (برگرفته از ۱۸ و ۲۴).

Table 6. Risk classification of the aquifer (Adapted from 18 and 24).

محدوده (شاخص DRASTICLU) Ranges (DRASTICLU index)	محدوده (شاخص SINTACSLU) Ranges (SINTACSLU index)	کلاس‌بندی ریسک‌پذیری Risk assessment classification
<120	<119	خیلی کم Very low
120-149	120-139	کم Low
150-179	140-179	متوسط Moderate
180-209	180-219	زیاد High
>209	>219	خیلی زیاد Very high

پیشچیده را بر اساس آثار متقابل آن‌ها مورد بررسی قرار می‌دهد و آن‌ها را به شکلی ساده تبدیل کرده و به حل آن می‌پردازد (۲۶). فرایند روش مذکور بر پایه ترکیبی از مجموعه‌ای از ماتریس‌های مقایسه دو به دو می‌باشد که همه معیارها را با یکدیگر مقایسه می‌کنند. این فرایند به منظور رتبه‌دهی و وزن‌دهی هر یک از

ریسک‌پذیری آبخوان و روش AHP: یکی از معتبرترین و پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، AHP است که اولین بار توسط ساعتی (۱۹۸۰) مطرح شد. این روش هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه و شاخص تصمیم‌گیری روبرو است، می‌تواند مفید باشد. روش AHP، مسائل

زوجی، نرخ ناسازگاری^۱ (IR) محاسبه گردید. برای محاسبه نرخ ناسازگاری ابتدا مقدار حداکثر بردار ویژه (λ_{max}) ماتریس مقایسه‌ای محاسبه و سپس از رابطه (۵)، شاخص ناسازگاری^۲ (I.I) به دست آمد. در این رابطه، n تعداد پارامترهای ماتریس مقایسه‌ای زوجی است. نرخ ناسازگاری از تقسیم شاخص ناسازگاری بر شاخص تصادفی (RI) به دست آمد. تصادفی، مطابق جدول ۷ تعیین شد. مقدار شاخص نرخ ناسازگاری کم‌تر از $0/1$ قابل قبول است (۲۰).

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

پس از تعیین وزن‌ها و رتبه‌های پارامترهای مؤثر در شاخص‌های DRASTICLU و SINTACSLU با روش AHP، لایه پارامترها تهیه و مطابق روش‌های قبلی در محیط GIS هم‌پوشانی شد و مطابق جدول ۶ طبقه‌بندی گردید.

معیارها در مقایسه با سایر معیارها است. این امتیازدهی، نشانگر اهمیت هر یک از معیارهای شرکت داده شده برای نیل به هدف کلی است (۴). برای مقایسه هر یک از معیارها از مقادیر ۱ تا ۹ استفاده می‌شود که عدد ۱ نشان می‌دهد که معیارها اهمیت یکسانی دارند و عدد ۹ نشان‌دهنده این است که یک معیار در مقایسه با معیارهای دیگر اهمیت قابل‌توجهی دارد (۲۹).

به منظور تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی مدل در انتقال آلودگی به آبخوان مورد مطالعه مطابق با شرایط واقعی، از روش AHP استفاده گردید. بدین منظور ابتدا ماتریس‌های مربعی برای پارامترهای مؤثر در شاخص‌ها تشکیل و سپس معیارها به صورت دو به دو مقایسه و مقادیری بین ۱ تا ۹ برای بیان اهمیت آن‌ها نسبت به هم اختصاص داده شد. بعد از تعیین وزن و رتبه واقعی هر کدام از پارامترها، برای اطمینان از درستی ماتریس مقایسه‌ای

جدول ۷- مقادیر شاخص تصادفی (برگرفته از ۲۶).

Table 7. The value of Random Index (Adapted from 26).

شاخص تصادفی Random Index (RI)	تعداد پارامتر Number of parameter (n)
0	1
0	2
0.58	3
0.9	4
1.12	5
1.24	6
1.32	7
1.41	8
1.45	9
1.49	10

1- Inconsistency Ratio

2- Inconsistency Index

نتایج و بحث

نتایج آسیب پذیری آبخوان: نقشه پهنه بندی آسیب پذیری روش DRASTIC (شکل ۲.a)، نشان می دهد که آسیب پذیری آبخوان دشت سراب در محدوده کم تا متوسط و متوسط تا زیاد قرار دارد. طبق نتایج این شاخص ۸۲/۶۲ درصد از نواحی دشت دارای پتانسیل آسیب پذیری متوسط است. مناطقی در جنوب شرقی دشت به وسعت ۴/۴۳ درصد از منطقه مورد مطالعه با آسیب پذیری کم تا متوسط ارزیابی شد و ۱۲/۹۴

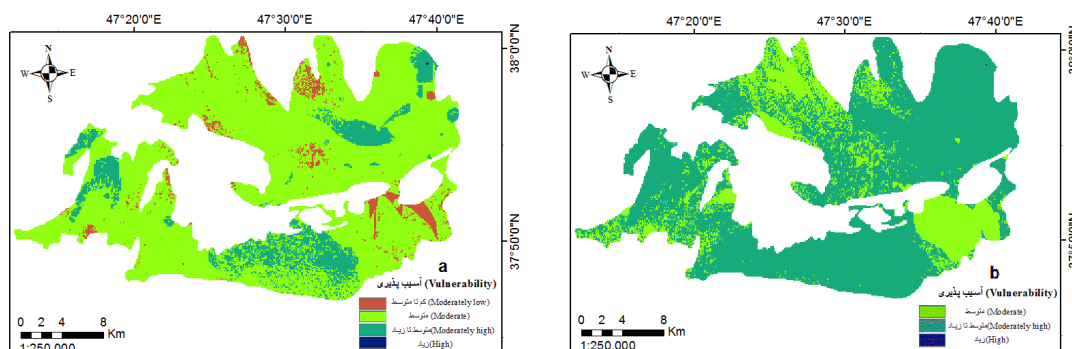
درصد از اراضی دشت آسیب پذیری متوسط تا زیاد را نشان داد (جدول ۸).

نتایج حاصل از مدل SINTACS (شکل ۲.b)، بیانگر آن است که آبخوان دشت سراب در دو کلاس آسیب پذیری متوسط با ۷۶ درصد از نواحی دشت و آسیب پذیری کم با ۲۳/۵ درصد از نواحی دشت قرار دارد (جدول ۹).

جدول ۸- نتایج شاخص DRASTIC برای منطقه مورد مطالعه.

Table 8. The results of DRASTIC index for the studied area.

درصد مساحت Part of the total area (%)	مساحت (کیلومتر مربع) Area (Km ²)	محدوده DRASTIC DRASTIC range	کلاس آسیب پذیری Vulnerability class
4.43	24.07	101.303-119	کم تا متوسط Moderately low
82.62	448.88	120-139	متوسط Moderate
12.94	70.31	140-159	متوسط تا زیاد Moderately high
0.01	0.05	160-166.632	زیاد High
100	543.31	جمع کل Total	



شکل ۲- a. طبقه بندی آسیب پذیری آبخوان دشت سراب با شاخص DRASTIC. b. طبقه بندی آسیب پذیری آبخوان دشت سراب با شاخص SINTACS.

Figure 2. Vulnerability map of Sarab Plain using a) DRASTIC index b) SINTACS Index.

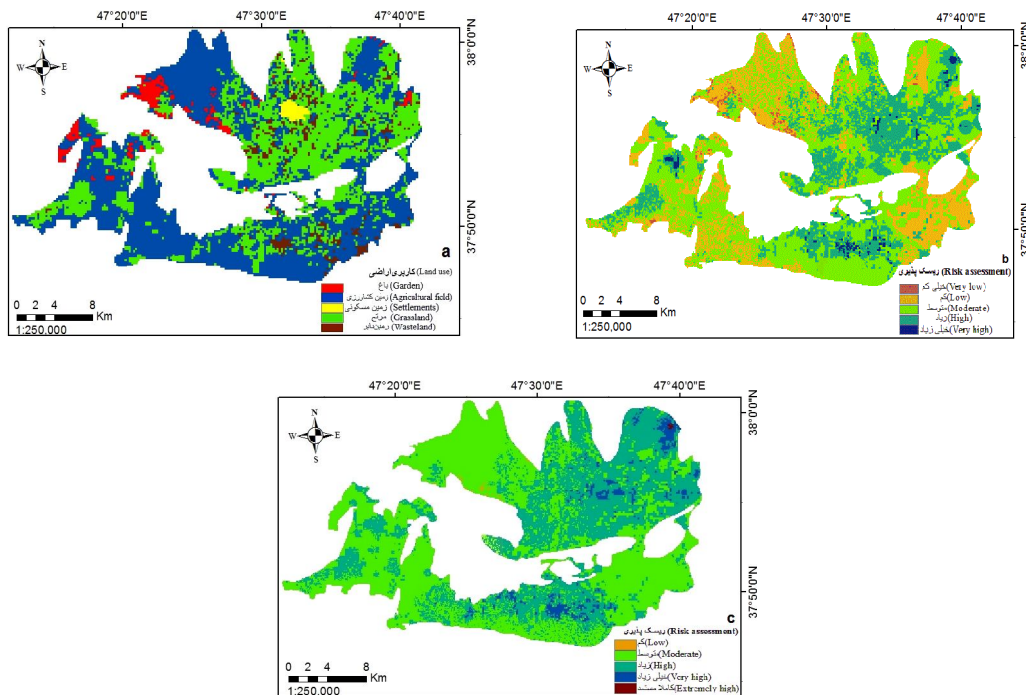
جدول ۹- نتایج شاخص SINTACS برای منطقه مورد مطالعه.

Table 9. The results of SINTACS index for the studied area.

درصد مساحت Part of the total area (%)	مساحت (کیلومتر مربع) Area (Km ²)	محدوده SINTACS SINTACS range	کلاس آسیب‌پذیری Vulnerability class
23.518	127.8	118-140	متوسط Moderate
76.478	415.59	140-186	متوسط تا زیاد Moderately high
0.004	0.02	186-190	زیاد High
100	543.31	جمع کل Total	

مطالعه دارای ریسک‌پذیری کم، ۴۸/۹۷ درصد دارای ریسک‌پذیری متوسط و ۲۴/۸۶ درصد دارای ریسک‌پذیری زیاد است (شکل ۳.b). نقشه SINTACSLU، به ترتیب ۰/۱۳، ۵۵/۳۵، ۴۰/۸۲ و ۳/۷۰ درصد از اراضی دشت سراب در محدوده ریسک‌پذیری کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارد (شکل ۳.c).

نتایج ریسک‌پذیری آبخوان: نقشه کاربری اراضی دشت سراب نشان می‌دهد که حدود ۴۰ درصد از اراضی دشت سراب به زمین‌های کشاورزی و باغی تعلق دارد و ۵۴ درصد دشت سراب به مراتع اختصاص یافته، باقی‌مانده زمین بایر و مسکونی است (شکل ۳.a). طبقه‌بندی نقشه DRASTICLU نشان می‌دهد که ۲۴/۱۰ درصد از وسعت منطقه مورد



شکل ۳- a. رتبه‌بندی کاربری زمین، b. طبقه‌بندی ریسک‌پذیری آبخوان دشت سراب با شاخص DRASTICLU، c. طبقه‌بندی ریسک‌پذیری آبخوان دشت سراب با شاخص SINTACSLU.

Figure 3. Sarab Plain: a) Land use map b) Risk mapping using DRASTICLU Index c) Risk mapping using SINTACSLU Index.

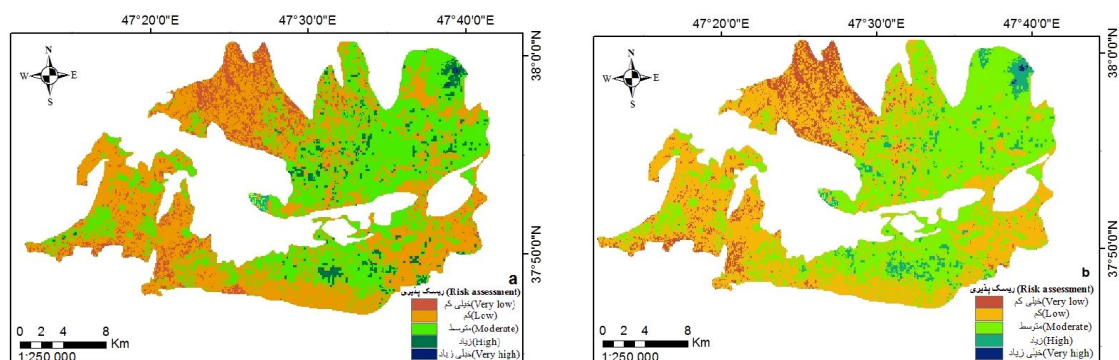
AHP-DRASTICLU به ترتیب ۷/۸۱، ۵۰/۸۶، ۳۷/۵۲ و ۳/۷۴ درصد از منطقه مورد مطالعه، در محدوده ریسک پذیری خیلی کم، کم، متوسط و زیاد قرار دارد (شکل ۴.a). طبقه بندی شاخص AHP-SINTACSLU نشان می دهد که آبخوان دشت سراب در چهار کلاس ریسک پذیری خیلی کم با ۷/۷۷ درصد از اراضی، کم با ۴۵/۸۰ درصد، متوسط با ۴۲/۴۸ درصد و زیاد با ۳/۸۷ درصد قرار دارد (شکل ۴.b).

برای کاهش خطای تصمیم گیری و انتخاب مقداری صحیح تر به هنگام تعیین وزن و رتبه پارامترهای مؤثر در شاخص های DRASTICLU و SINTACSLU با روش AHP، از چندین قضاوت کارشناسی استفاده و در نتیجه چندین مدل برای محاسبه شاخص ریسک پذیری اجرا شد و در نهایت بر اساس همبستگی شاخص آسیب پذیری نهایی و غلظت نترات در آبخوان منطقه، بهترین وزن دهی انتخاب شد (جدول ۱۰). طبق نتایج شاخص

جدول ۱۰- نتایج وزن دهی شاخص های ریسک پذیری آبخوان دشت سراب با AHP.

Table 10. Weighting of risk capacity indexes of the Sarab plain aquifer using AHP.

AHP-SINTACSLU		AHP-DRASTICLU	
وزن Weight	پارامتر Parameter	وزن Weight	پارامتر Parameter
0.251	S	0.267	D
0.053	I	0.059	R
0.194	N	0.065	A
0.147	T	0.114	S
0.086	A	0.073	T
0.036	C	0.184	I
0.086	S	0.031	C
0.147	LU	0.199	LU
0.0106	نرخ ناسازگاری Inconsistency ratio	0.0350	نرخ ناسازگاری Inconsistency ratio

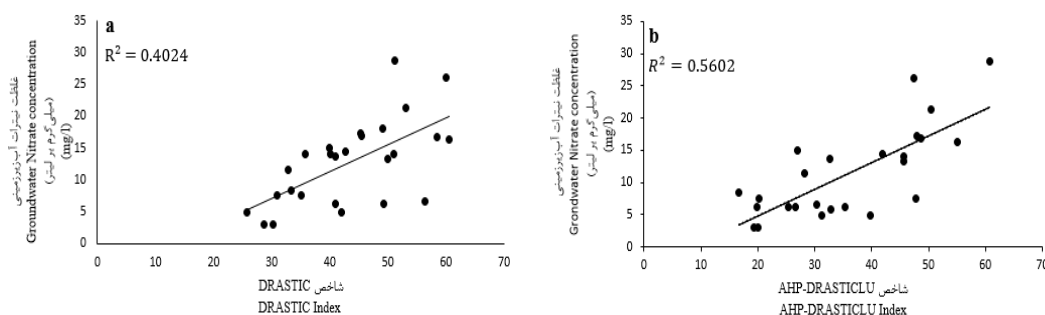


شکل ۴- a. طبقه بندی ریسک پذیری آبخوان دشت سراب با شاخص AHP-DRASTICLU، b. طبقه بندی ریسک پذیری آبخوان دشت سراب با شاخص AHP-SINTACSLU.

Figure 4. Sarab plain: Risk mapping using a) AHP-DRASTICLU Index b) AHP-SINTACSLU Index.

کدام از شاخص‌ها محاسبه شد. با توجه به این‌که بازه تغییرات مقادیر آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری به دست آمده از شاخص‌ها مشابه نیست با استفاده از رابطه ۷، نرمال‌سازی انجام شد تا بازه تغییرات مقادیر در محدوده ۰ تا ۱۰۰ باشد. در این رابطه X_{norm} مقدار نرمال شده و X_{min} و X_{max} به ترتیب، حداقل و حداکثر مقدار شاخص هستند (۲۹). در نهایت، مقادیر R^2 به دست آمده از نقشه‌های آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری باهم مقایسه شدند. در بین نقشه‌های آسیب‌پذیری، نقشه DRASTIC و در بین نقشه‌های ریسک‌پذیری، نقشه AHP-DRASTICLU دقت بیشتر و R^2 بالاتری نسبت به سایر شاخص‌ها داشتند (شکل ۵).

$$X_{norm} = (X - X_{min} / X_{max} - X_{min}) \times 100 \quad (7)$$



شکل ۵- a. رابطه بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC با غلظت نترات در دشت سراب، b. رابطه بین شاخص ریسک‌پذیری AHP-DRASTICLU با غلظت نترات در دشت سراب.

Figure 5. a) The relationship between DRASTIC vulnerability index and Nitrate concentration for Sarab plain b) The relationship between AHP-DRASTICLU risk capacity index and Nitrate concentration for Sarab plain.

زیرزمینی دشت سراب در محیط نرم‌افزار Arc GIS مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نقشه DRASTIC، آسیب‌پذیری منطقه در محدوده ۱۶۶/۶۳-۱۰۱/۳۰ قرار گرفت. طبق این شاخص، ۸۲/۶۲ درصد از وسعت منطقه مورد مطالعه دارای آسیب‌پذیری متوسط، ۴/۴۳ و ۱۲/۹۴ درصد به ترتیب دارای آسیب‌پذیری کم تا متوسط و متوسط تا زیاد است. براساس نقشه SINTACS، آسیب‌پذیری منطقه

صحت‌سنجی نقشه‌های آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری: با توجه به گستردگی فعالیت‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه و کاربرد کودهای شیمیایی و آلی، برای واسنجی و صحت‌سنجی شاخص‌ها از غلظت نترات استفاده شد (۱، ۱۱، ۲۴، ۲۸ و ۲۹). برای این منظور، مقادیر غلظت نترات اندازه‌گیری شده در ۲۵ چاه کشاورزی موجود در دشت سراب (در محدوده ۲۹-۳/۱ میلی‌گرم بر لیتر) که مربوط به تابستان سال ۱۳۹۳ است، تهیه گردید. موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری غلظت نترات در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده خطی ابتدا از ارزش پیکسل‌ها در هر کدام از نقشه‌ها به‌عنوان متغیرهای مستقل و از غلظت نترات‌های آب زیرزمینی به‌عنوان متغیر وابسته استفاده و ضریب تبیین (R^2) برای هر

نتیجه‌گیری کلی

آب زیرزمینی دشت سراب در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت شهرستان سراب نقش مهمی دارد. افزایش فعالیت‌های کشاورزی و نرخ برداشت از آب‌های زیرزمینی، زمینه‌ساز توجه اساسی به مسأله آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی در این منطقه است. بدین‌منظور در این پژوهش با استفاده از مدل‌های DRASTIC و SINTACS آسیب‌پذیری آب‌های

ساده تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد که در بین شاخص‌های آسیب‌پذیری، شاخص DRASTIC با ضریب تبیین ۰/۴۰ و در بین شاخص‌های ریسک‌پذیری، شاخص AHP-DRASTILU با ضریب تبیین ۰/۵۶، دارای R^2 بالاتری نسبت به بقیه شاخص‌ها هستند. این نتیجه در مقایسه با کار پژوهشگرانی مانند سینر و داوراز (۲۰۱۳) که برای بررسی پتانسیل آلودگی حوضه دریاچه اجیردیر در ترکیه انجام شد (۲۹)، ساحا و آلام (۲۰۱۴) که به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوانی در دشت گنجتیک هند، انجام شد (۲۸) و آصفی و همکاران (۱۳۹۳) که برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت اندیمشک انجام شد (۴) قابل‌قبول است. بنابراین برای ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری آبخوان دشت سراب، نتایج مدل‌های DRASTIC و AHP-DRASTILU معتبرتر و دقیق‌تر هستند. بخش زیادی از اراضی کشاورزی و باغات منطقه در شمال، شمال‌شرقی و قسمت میانه دشت واقع شده‌اند و طبق طبقه‌بندی شاخص DRASTIC و AHP-DRASTILU به‌ترتیب در محدوده آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری متوسط هستند؛ بنابراین در این مناطق برای جلوگیری از ورود بیش‌تر آلودگی به منابع آب زیرزمینی در آینده، باید مراقبت و کنترل بیش‌تری صورت گیرد و از توسعه بیش از اندازه واحدهای صنعتی آلاینده و زمین‌های کشاورزی پرهیز شود. نقشه‌های آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری می‌توانند به‌عنوان یک راهنما برای برنامه‌ریزی کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه توسط مدیران محلی به‌کار گرفته شوند.

در محدوده ۱۹۰-۱۱۸ قرار گرفت و ۷۶/۴۸ درصد منطقه دارای آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد، ۲۳/۵۲ درصد با آسیب‌پذیری کم ارزیابی شد. همچنین با اضافه کردن پارامتر کاربری اراضی، نقشه‌های ریسک‌پذیری منطقه تهیه شد. ضعف عمده دو مدل SINTACSLU و DRASTICLU، لزوم اعمال نظرات کارشناسی برای نرخ‌بندی پارامترها و زیرپارامترهای به‌کار رفته در آنها است. از این‌رو بعد از تهیه نقشه‌های ریسک‌پذیری با این دو شاخص به‌منظور اعمال شرایط هیدروژئولیکی محلی دشت سراب، از طریق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، دو شاخص جدید AHP-DRASTICLU و AHP-SINTACSLU تعریف شدند. طبق نتایج شاخص DRASTICLU، ۲۴/۱۰ درصد از وسعت منطقه مورد مطالعه دارای ریسک‌پذیری کم، ۴۸/۹۷ درصد دارای ریسک‌پذیری متوسط و ۲۴/۸۶ درصد دارای ریسک‌پذیری زیاد است. در طبقه‌بندی نقشه SINTACSLU به‌ترتیب ۵۵/۳۵ و ۴۰/۸۲ درصد از اراضی دشت سراب در محدوده ریسک‌پذیری متوسط و زیاد قرار گرفت. همچنین طبق نتایج شاخص AHP-DRASTICLU به‌ترتیب ۷/۸۱، ۵۰/۸۶، ۳۷/۵۲، ۳/۷۴ درصد از منطقه مورد مطالعه، با ریسک‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط و زیاد ارزیابی شد و شاخص AHP-SINTACSLU نتایجی مشابه شاخص AHP-DRASTICLU را نشان داد.

به‌منظور انتخاب بهترین شاخص آسیب‌پذیری و ریسک‌پذیری از نظر تفکیک منطقه حساس به ورود آلودگی، پس از نرمال کردن نقشه‌ها، همبستگی بین غلظت نیترات آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه و مقدار هر کدام از شاخص‌های محاسبه‌شده برای منطقه مورد مطالعه، با روش تحلیل رگرسیون خطی

منابع

1. Ahmadi, J., Akhondi, L., Abbasi, H., Khashei-Siuki, A., and Alimadadi, M. 2013. Determination of aquifer vulnerability using DRASTIC model and a single parameter sensitivity analysis and acts and omissions (Case study: Salafchegan-Neyzar plain). *J. Water Soil Cons.* 20: 3. 1-25. (In Persian)
2. 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. J. Environ. Geol.* 50: 5. 651-667.
3. Aller, L., Lehr, J.H., Petty, R., and Bennett, T. 1987. Drastic: a standardized system to evaluate Ground Water pollution potential using hydrogeologic settings. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S, Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035).
4. Asefi, M., Radmanesh, F., and Zarei, H. 2014. Optimization of DRASTIC and SINTACS methods based on GIS and an analytic hierarchy process (Case study: Andimeshk plain). *J. Environ. Stud.* 40: 1. 79-94. (In Persian)
5. Bai, L., Wang, Y., and Meng, F. 2011. Application of DRASTIC and Extension theory in the groundwater vulnerability evaluation. *J. Water Environ.* 26: 3. 381-391.
6. CIVITA, M. 1990. La valutazione della vulnerabilita degli aquifer all'inquinamento. Proc. 1st con. naz. protezione gestione delle acque sotterranee: metodologie, tecnologie e obiettivi. Maranosul Panaro. Pp: 39-86.
7. Derakhshani, R., and Alipur, M. 2009. Assessment groundwater sensitivity to pollution using Geographic information systems in Khatunabad plain. *J. Geotech. Geol.* 5: 4. 285-291. (In Persian)
8. Doerflinger, N., Jeannin, P., and Zwahlen, F. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multiattribute approach and GIS tools (EPIK Method). *J. Environ. Geol.* 39: 2. 165-176.
9. East Azerbaijan Agricultural Organization. 2010. Report of agricultural production efficiency in Sarab city. (In Persian)
10. East Azarbayjan Regional Water Authority. 2009. Groundwater Studies in Sarab plain. (In Persian)
11. Farjad, B., Shafri, H.Z.B.M., Mohamed, T.A., Pirasteh, S., and Wijesekara, N. 2012. Groundwater intrinsic vulnerability and risk mapping. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management.* 165: 8. 441-450.
12. Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., and Paris, M. 2007. Groundwater Quality Protection. The World Bank, Washington, D.C, Pp: 2-30.
13. Kapelj, S., Loborec, J., and Kapelj, J. 2013. Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method. *Geologia Croatica.* 66: 2. 119-128.
14. Kardan Moghaddam, H., and Javadi, S. 2016. Evaluation vulnerability coastal aquifer by GALDIT index and calibration by AHP method. *J. Water Soil Cons.* 23: 2. 163-177. (In Persian)
15. Kumar, S., Thirumalaivasan, D., Radhakrishnan, N., and Mathew, S. 2013. Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model. *Geomatics, Natural Hazards and Risk.* 4: 4. 339-354.
16. Leal, J.A.R., Silva, F.O.T., and Montes, I.S. 2012. Analysis of aquifer vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regression. *J. Environ. Earth Sci.* 66: 8. 2257-2271.
17. Mahmoodzadeh, E., Rezaian, S., and Ahmadi, A. 2013. Assessment of aquifer vulnerability by DRASTIC, GODS and AVI comparative methods of the Meymeh plain of Isfahan. *J. Environ. Stud.* 39: 2. 45-60. (In Persian)
18. Mansourian, H. 2011. Assessment of waterlogging and provide risk maps by using RS, GIS and field data (Case study: Qazvin plain). M.Sc. Thesis, Civil Engineering, Sharif University of Technology.

19. Marofi, S., Soleymani, S., Ghobadi, M.H., Rahimi, Gh., and Marofi, H. 2012. Vulnerability assessment of Malayer plain groundwater by SINTACS, DRASTIC and SI models. *J. Water Soil Cons.* 19: 2. 141-166. (In Persian)
20. Neshat, A., Pradhan, B., and Dadras, M. 2014. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Resources, Conservation and Recycling.* 86: 74-86.
21. NRC (National Research Council). 1993. Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty. Washington, D.C. National Academy Press.
22. Palmer, R.C., Holman, I.P., Robins, N.S., and Lewis, M.A. 1995. Guide to groundwater vulnerability mapping in England and Wales. National Rivers Authority R and D Note, Pp: 11-36.
23. Piscopo, G. 2001. Groundwater vulnerability map explanatory notes. Castlreagh Catchment. NSW Department of Land and Water Conservation, Australia.
24. Remesan, R., and Panda, R.K. 2008. Groundwater vulnerability assessment, risk mapping, and nitrate evaluation in a small agricultural watershed: using the DRASTIC model and GIS. *J. Environ. Qual. Manage.* 17: 4. 53-75.
25. Ribeiro, L. 2000. Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade. ERSHA-CVRM, 8p.
26. Saaty, T.L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.* McGraw-Hill, New York.
27. Safavi, H.R. 2014. *Engineering Hydrology.* Arkan Danesh Publications, Isfahan, 408p. (In Persian)
28. Saha, D., and Alam, F. 2014. Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC and Pesticide DRASTIC models in intense agriculture area of the Gangetic plains, India. *J. Environ. Monitor. Assess.* 186: 87. 41-8763.
29. Sener, E., and Davraz, A. 2013. Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeol. J.* 21: 3. 701-714.
30. Stempvoort, D.V., Ewert, L., and Wassenaar, L. 1993. Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can. Water Resour. J.* 18: 1. 25-37.
31. Tabarmayeh, M., and Vaezi Hir, A. 2015. Investigation on Vulnerability of Tabriz-plain Unconfined Aquifer. *J. Water Soil.* 28: 6. 1137-1151. (In Persian)
32. Todd, D.K., and Mays, L.W. 2005. *Groundwater Hydrology.* John Wiley & Sons, New York, Pp: 1-119.
33. Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., and Carrasco, F. 2005. A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *J. Environ. Geol.* 47: 4. 586-595.
34. Vrba, J., and Zoporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH International Contribution for Hydrogeology. Hannover7 Heise, 16: 131.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(3), 2017
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Mapping the risk of groundwater pollution using GIS (Case study: Sarab plain)

R. Ahmadifar¹, *S.M. Mousavi² and M. Rahimzadegan²

¹M.Sc. Student, Dept. of Engineering and Water Resources Management, KN Toosi University of Technology, ²Assistant Prof., Dept. of Engineering and Water Resources Management, KN Toosi University of Technology

Received: 10/03/2016; Accepted: 06/19/2017

Abstract

Background and Objectives: The protection of the quality of groundwater is very important considering its vast usages in agriculture, industry and as drinking water. Removing groundwater pollution is an expensive process and needs a long time. Therefore, it is necessary to prevent the pollution of groundwater resources using proper methods. One of the usual methods is to investigate areas with high potentials to get polluted. The aim of this study choose a suitable method to identify areas sensitive to pollution in Sarab plain.

Materials and Methods: Two models DRASTIC and SINTACS were used in “Sarab” plain to evaluate the pollution of groundwater resources. First, the vulnerability maps of the aquifer were provided for each model. To do this, the information layers of “depth of groundwater table”, “net recharge”, “aquifer media”, “soil media”, “topography”, “the effect of vadose zone” and “hydraulic conductivity of the aquifer” were prepared in GIS. As the next step, the land use parameter was combined with the vulnerability maps, to prepare risk assessment maps. Also, to consider hydrogeological condition of the studied area, AHP method was used to correctly evaluate the weights and the ranks of the effective parameters and sub-parameters in DRASTICLU and SINTACSLU modified models. The correlation coefficient between the concentration of the Nitrate in groundwater and the calculated indexes for the studied area was calculated using linear regression.

Results: Based on DRASTIC map, 82.62% of the studied area has medium vulnerability potential. However, 14.43% and 12.94% of the area have low to medium and medium to high vulnerability potential respectively. On the other hand, based on SINTACS maps, the vulnerability potential in 76.48% and 23.52% of the studied area is medium to high and low respectively. Also, according to the results of DRASTICLU index, 24.10%, 48.97% and 24.86% of the studied area are evaluated with low, medium and high risk respectively. However, based on SINTACSLU map, 55.35%, 40.82% of Sarab plain are located in areas with medium and high risk respectively. Besides, according to AHP-DRASTICLU index 7.81%, 50.86%, 37.52% and 3.74% of the studied plain are evaluated as areas with very low, low, medium and high risk respectively. AHP-SINTACSLU index shows similar results to AHP-DRASTICLU index.

Conclusion: To be able to choose the best index to evaluate the potential of vulnerability and risk for Sarab plain, the correlations between Nitrate concentration in groundwater on one hand and the amount of each of the used indexes were investigated. According to the results, DRASTIC index with $R^2=0.40$ has the highest correlation among the investigated indexes. However, regarding risk evaluation, AHP-DRASTICLU index has the highest correlation, with $R^2=0.56$. Therefore, to evaluate pollution vulnerability and risk in Sarab plain, these two indexes are the most accurate and trustable.

Keywords: Vulnerability and risk, Sarab plain, DRASTIC, SINTACS, Analytical hierarchy process (AHP)

* Corresponding Author; Email: m_mousavi@kntu.ac.ir