



ارزیابی روش‌های مختلف آسیب‌پذیری آبخوان ابرفتی و ساحلی (منطقه مورد مطالعه: استان گیلان محدوده آستانه-کوحصفهان)

حمید کاردان مقدم^۱، سامان جوادی^{۲*}، زهرا رحیم‌زاده کیوی^۳

۱. استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

چکیده

یکی از راه‌کارهای برقراری تعادل زیست‌محیطی، بررسی و مدیریت آسیب‌پذیری آبخوان است. جهت تصمیم‌گیری و مدیریت آبخوان لزوم برنامه‌ریزی جهت شناسایی عرصه‌های آسیب‌پذیر بسیار مهم است. روش‌ها و شاخص‌های متعددی جهت بررسی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها ارائه شده‌اند که هر یک از این شاخص‌ها براساس مجموعه‌ای از فاکتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه از پنج شاخص آسیب‌پذیری در منطقه ساحلی به منظور بررسی و مقایسه این روش‌ها نسبت به هم مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص‌های GODS، GALDIT، SI، SINTACS، DRASTIC و GODS به بررسی وضعیت حساسیت آبخوان از نظر ذاتی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج استخراجی از این پنج شاخص با توجه به ماهیت هر یک از آن‌ها متفاوت بوده و به منظور افزایش دقت نتایج و استفاده کاربردی از این نتایج در مناطق ساحلی واسنجی وزن و رتبه‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی انجام گرفت. به این منظور از همبستگی بین هر شاخص آسیب‌پذیری با غلظت TDS، نترات و کلراید استفاده و وزن پارامترهای هر شاخص واسنجی گردید. آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف در شاخص‌های آسیب‌پذیری نشان داد که شاخص GALDIT با توجه به در نظرگیری اثر پیشروی آب شور دریا این حساسیت را در نتایج منعکس می‌کند. پارامتر عمق تا سطح ایستابی در سایر شاخص‌ها و پارامتر فاصله از دریا معیار حساس و با اهمیتی در شاخص GALDIT بوده و پس از واسنجی مدل مشخص گردید ۳۰ درصد آبخوان در معرض جبهه‌های شور نفوذ آب دریا قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری، آنالیز حساسیت، شاخص GALDIT، مدیریت آبخوان.

Evaluation of Aquifer Vulnerability Assessment Methods for Alluvial and Coastal Aquifers, Case Study in Astaneh-Koochesfahan Aquifer, Guilan, Iran

Hamid Kardan Moghaddam¹, Saman Javadi^{2*}, Zahra Rahimzadeh Kivi³

1. Assistant Professor, Department of Water Resources Research, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: March 12, 2020

Accepted: May 22, 2020

Abstract

One way to balance the environment is to study and manage aquifer vulnerabilities. In order to decide and manage the aquifer, the need for planning to identify vulnerable areas is very important. Several methods and indicators to assess the vulnerability of the aquifer are presented in each of these indicators is based on a set of factors used. In this study, 5 vulnerability indicators have been used in the coastal region to investigate and compare these methods. The characteristics of DRASTIC, SINTACS, SI, GALDIT and GODS were investigated to assess the sensitivity of the aquifer inherently. The results of these 5 indicators were different according to the nature of each of them and in order to increase the accuracy of the results and practical use of these results in coastal areas, weight and rankings were performed using hierarchical and entropy analysis method. For this purpose, the correlation between the vulnerability index concentrations of TDS, nitrate and chloride and weights of each indicator was calibrated. Sensitivity analysis of various parameters in vulnerability indicators showed that GALDIT index reflects this sensitivity in the results, considering the effect of sea salt water progress. Depth parameter to static level in other indicators and distance parameter from the sea is a sensitive and important criterion in GALDIT index and after model calibration, it was found that 30% of aquifers are exposed to the saline fronts of sea water infiltration.

Keywords: GALDIT index, Management aquifer, Sensitivity analysis, Vulnerability

مقدمه

آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک که با کمبود منابع سطحی مواجه هستیم از اهمیت ویژه‌ای، به‌خصوص در مباحث بهره‌برداری برخوردار است (۶). آبخوان‌های محصورنشده و نفوذپذیر پتانسیل بالایی برای آلودگی و آسیب‌پذیری دارند (۱۶ و ۱۷). مطالعات زیادی که از اوایل دهه ۹۰ میلادی تاکنون انجام شده‌اند، نشان داده‌اند که ارزیابی آسیب‌پذیری روشی قدرتمند و کم‌هزینه در شناسایی نواحی مستعد به آلودگی است. برآورد آسیب‌پذیری می‌باید بر مبنای یک روش علمی با در نظر داشتن دقت و شواهد منطقه‌ای انجام شود. در حال حاضر روش‌های متعددی در جهت برآورد آسیب‌پذیری ارائه شده است که می‌توان به روش‌های DRASTIC، WESPA، EPIK، AVI، GODS، PI، SI، SINTACS، IRISH، MAIA، PESTICIDE، GALDIT و ... اشاره داشت. آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیر قابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (۷). عبارت آسیب‌پذیری در هیدروژئولوژی برای اولین بار توسط مارگات^۱ در سال ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفته است. وی آسیب‌پذیری آبخوان را امکان نفوذ و بخش آلودگی از سطح زمین به سطح آب مخازن طبیعی در شرایط طبیعی تعریف می‌کند (۸). البته در سال‌های اخیر تعاریف متعددی از این مبحث معرفی و ارائه شد که به‌طور کلی می‌توان آسیب‌پذیری را تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از تولید در برخی محل‌ها در سطح زمین دانست. به‌طور کلی آسیب‌پذیری از نظر مفهوم به دو دسته ذاتی و ویژه تقسیم می‌گردد. در آسیب‌پذیری ذاتی نوع آسیب‌پذیری به خصوصیات آبخوان (هدایت هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و خلل و فرج و تنش‌های وارده به سیستم

تغذیه، واکنش با آب سطحی، زمان حرکت از میان منطقه اشباع و بده پمپاژ) بستگی دارد و به منابع آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی یا طبیعی ربطی ندارد. در آسیب‌پذیری ویژه آلاینده‌ای خاص یا گروهی از آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های ناشی از واکنش آلاینده‌ها با اجزای مختلف آسیب‌پذیری ذاتی، به‌وجود می‌آیند. کاردان مقدم و جوادی (۵) در سال ۱۳۹۵ با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۲ و اسنچی روش GALDIT را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد که پارامتر فاصله از دریا معیار حساس و با اهمیتی در شاخص GALDIT بوده و پس از اسنچی مدل مشخص گردید ۳۰ درصد آبخوان در معرض جبهه‌های شور نفوذ آب دریا قرار گرفته است. جوانشیر (۳) و همکاران در سال ۱۳۹۵ با استفاده از ترکیب سه روش دراستیک، سینتکس و SI روش جدید جهت آسیب‌پذیری آبخوان ارائه دادند. این شاخص جدید همبستگی بیش‌تری نسبت به استفاده از هر روش با غلظت پارامترهای کیفی داشته و براساس همبستگی بین غلظت نیترات با آسیب‌پذیری این روش جدید ارائه شده است. سلطانی (۴) و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی آسیب‌پذیری دشت کردکندی- دوزدوزان با استفاده از دو روش GODS و AVI پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از تأثیر مستقیم فعالیت‌های کشاورزی و افزایش غلظت نیترات در مناطق آسیب‌پذیر پرداختند. مناطق شمال‌غربی و شرق آبخوان براساس روش AVI و شمال‌غربی و جنوب‌شرقی آبخوان نیز براساس روش GODS به‌عنوان مناطق حساس معرفی شدند. کاردان مقدم (۱۸) و همکاران در سال ۲۰۱۷ دو روش آسیب‌پذیری دراستیک و GALDIT را در آبخوان آستانه- کوچصفهان مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه اسنچی دو روش جهت بهبود نتایج با استفاده از روش AHP با غلظت TDS انجام دادند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که همبستگی بین غلظت TDS با شاخص

آسیب‌پذیری و تشریح آنها، واسنجی این شاخص‌ها با دو روش AHP و آنتروپی و استفاده از چهار پارامتر کیفی مؤثر در کیفیت آبخوان برای واسنجی است. نتایج این پژوهش برای اولین بار به ارزیابی پنج شاخص مرسوم آسیب‌پذیری در آبخوان‌ها پرداخته است که این موضوع می‌تواند جهت انتخاب یک شاخص آسیب‌پذیری بسیار مهم باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

محدوده آستانه-کوچصفهان یکی از زیرحوزه‌های آبریز سفیدرود و تالش-تالاب انزلی بوده که با وسعت معادل ۲۸۳۵ کیلومترمربع در جنوب‌غربی دریای خزر بین طول شرقی ۴۹ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه و عرض شمالی، ۳۶ درجه و ۴۰ دقیق تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه قرار دارد. این حوزه از شمال به دریای خزر، از شرق به محدوده مطالعاتی لاهیجان-چابکسر و حوزه‌های منجیل و طالقان-الموت در جنوب و فومنات در غرب محدود می‌باشد. از لحاظ سیاسی گستره موردنظر در استان گیلان می‌باشد. به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری با روش‌های مختلف مطابق جدول (۱) فرآیند جمع‌آوری داده‌ها انجام گرفت. هم‌چنین در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است.

دراستیک ۴۸ درصد و با شاخص GALDIT میزان ۵۸ درصد است. بردبار و همکاران (۹ و ۱۰) در تحقیقات مختلفی در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری GALDIT و واسنجی این شاخص در آبخوان گرگان-قره‌سو پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامتر TDS یک پارامتر کیفی مناسب جهت واسنجی و استفاده از رویکردهای جدید جهت واسنجی وزن و رتبه‌های این شاخص نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد. هم‌چنین رویکردهای مختلف باعث بهبود نتایج آسیب‌پذیری در آبخوان ساحلی شده است.

مطالعات گسترده‌ای در استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری جهت ارزیابی شرایط توسعه از دیدگاه منابع آب زیرزمینی انجام گرفته است که هیچ‌کدام از این مطالعات به بررسی و ابعاد مختلف چندین شاخص آسیب‌پذیری نپرداخته است. در این مطالعه به بررسی و تحلیل روش‌های مختلف آسیب‌پذیری در آبخوان آستانه-کوچصفهان، که یک آبخوان ساحلی و سطح بالای آن دارای اراضی کشاورزی است مورد تحلیل قرار گرفته است. هدف از این مطالعه انتخاب یک روش مناسب جهت برآورد آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی، واسنجی با استفاده از پارامترهای کیفی مؤثر و انتخاب روش مناسب جهت واسنجی است. یکی از مهم‌ترین ابعاد و نوآوری این پژوهش در نظرگیری توامان پنج شاخص

Table 1. Data collection for evaluation of vulnerability index

Parameters	Model of processing	Data Source
Groundwater level	Interpolation	Time series of observational wells in the region in 2017
Aquifer recharge	Interpolation	Average infiltration resulted from rainfall and surface runoff in a 20-year period (1997-2017)
Aquifer media	Interpolation	Logging of existing explorative and discovery wells in the region
Soil media	Digitization	Available soil maps
Topography	Digitization	Topographic maps and digital elevation model
Vados zone	Interpolation	Classification of unsaturated zone based on well logging in the region
Hydraulic conductivity	Interpolation	Estimation based on transmissibility in aquifer using pumping tests
Land use	Digitization image processing	Land sat 8 images
Qualitative sampling of water resources	Interpolation	Sampling from selected wells in 2017

روش تحقیق

شاخص آسیب‌پذیری و پارامتر کیفی در آبخوان است. به این منظور سه پارامتر کیفی TDS، کلراید و نیترات به‌عنوان پارامترهای کیفی در آبخوان انتخاب می‌شود. در نهایت با دو روش، واسنجی انجام و نتایج دو روش براساس حداکثر مقدار ضریب همبستگی روش مناسب جهت واسنجی انتخاب می‌شود. در نهایت شاخص‌های آسیب‌پذیری برای آبخوان ارزیابی می‌شود.

با توجه به هدف این پژوهش که ارائه پنج شاخص آسیب‌پذیری در مناطق آبرفتی و واسنجی این شاخص‌ها با استفاده از دو روش آنالیز و AHP است، لذا با توجه به خصوصیات منطقه، پارامترهای شاخص‌ها محاسبه و با استفاده از GIS طبقه‌بندی آسیب‌پذیری انجام می‌گیرد. به‌منظور واسنجی هدف افزایش ضریب همبستگی بین

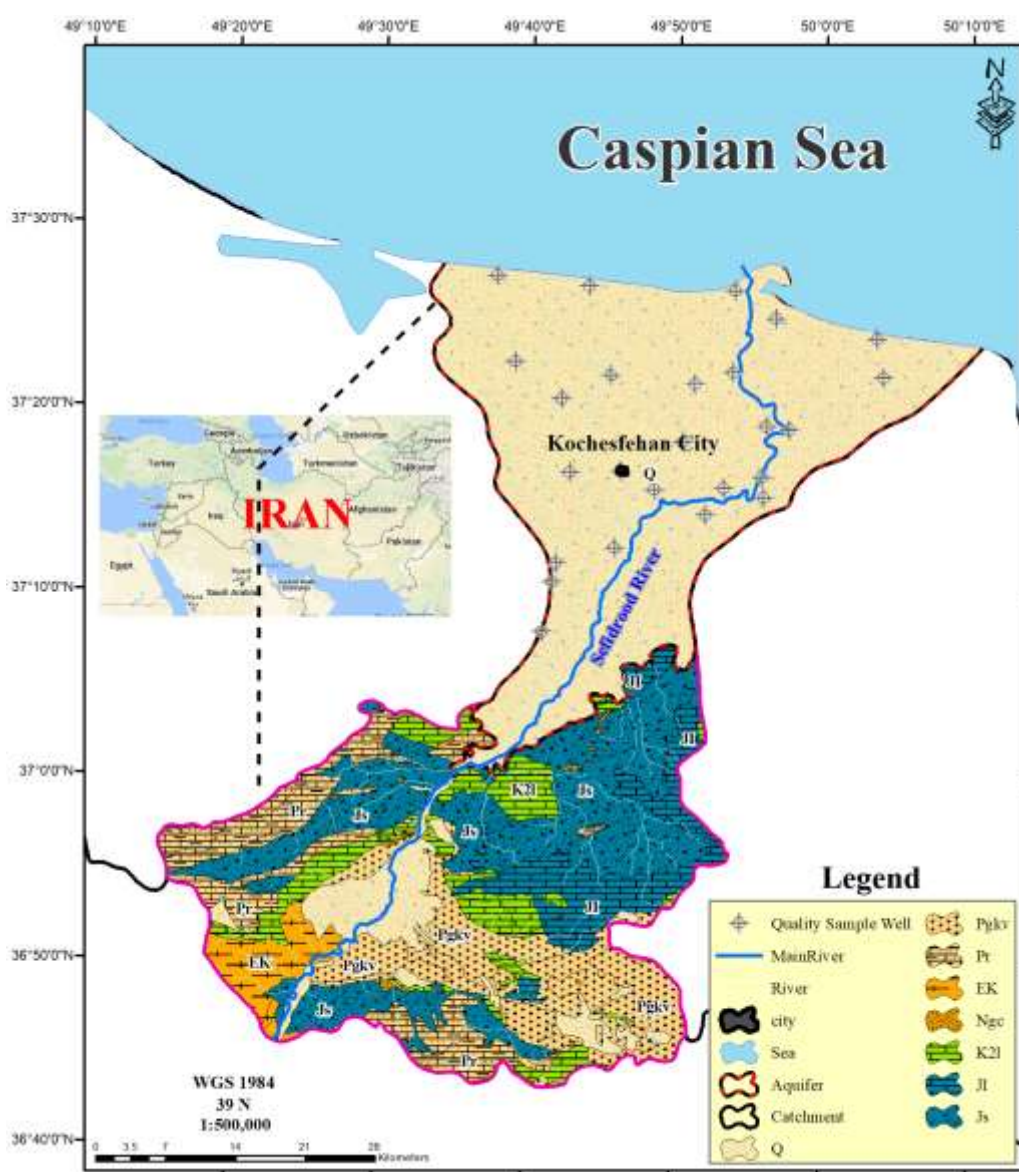


Figure 1. Case study

شاخص GALDIT

می‌شود. با توجه به تراز آب دریا و تراز آب زیرزمینی در آبخوان که از چاه‌های مشاهده‌ای به دست می‌آید پارامتر ارتفاع آب زیرزمینی که بالاتر از سطح آب دریا است محاسبه می‌شود. براساس دستورالعمل محاسبه شاخص GALDIT، فاصله ۵۰۰ متر، ۷۵۰، ۱۰۰۰ و بیش از ۱۰۰۰ متر از خط ساحلی به عنوان فاصله از ساحل دریا محاسبه می‌شود. به منظور تعیین تأثیر کیفی تجاوز آب دریا به آبخوان از رابطه (۱) استفاده می‌شود. این پارامترهای کیفی با توجه به تأثیر آب شور بر کیفیت آبخوان استخراج می‌شود. نقشه پهنه‌بندی به عنوان ورودی این پارامتر در آبخوان کلاس‌بندی می‌شود.

$$CI = \frac{Cl^-}{[CO_3^{2-} + HCO_3^-]} \quad (1)$$

مقدار ضخامت آبخوان نیز براساس اختلاف بین توپوگرافی و سنگ بستر (لایه نفوذناپذیر) آبخوان محاسبه می‌شود. در جدول (۲) پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری و تقسیم‌بندی شاخص از نظر آسیب‌پذیری ارائه شده است.

شاخص DRASTIC

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) در سال ۱۹۸۷ به عنوان سیستمی استاندارد برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی نسبت به آلودگی ارائه شده است (۸). اولین هدف روش دراستیک اعمال فعالیت‌های اجرایی-مدیریتی درخصوص آب‌های زیرزمینی است.

این شاخص در سال ۲۰۰۱ توسط چاچادرو و لوبو فریرا (۱۲ و ۱۱) در نواحی ساحلی کشور پرتغال مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل به عنوان یکی از روش‌های آسیب‌پذیری در نواحی ساحلی به خصوص در نوار دریای مدیترانه مورد استفاده قرار گرفت. غلظت بالای کل جامدات محلول در آب‌های شور سبب تغییرات غیرآلی در آبخوان‌های ساحلی و زندگی روزمره مردم این مناطق می‌شود (۲). تجاوز آب شور سبب کاهش حجم ذخیره آب شیرین و افزایش غلظت جامدات محلول و یونها در آب و در نهایت افزایش درجه استاندارد آب شرب منطقه می‌شود. این مدل از شش پارامتر که مخفف کلمه GALDIT می‌باشد تشکیل شده است. نوع آبخوان (G)، هدایت هیدرولیکی آبخوان (A)، ارتفاع آب زیرزمینی که بالاتر از سطح آب دریا قرار دارد (L)، فاصله تا ساحل دریا (D)، تأثیر کیفی تجاوز آب دریا در نوار ساحلی (I) و ضخامت آبخوان (T) پارامترهای این شاخص است.

به منظور تعیین پارامترهای این شاخص از اطلاعات کمی و کیفی در دو بخش استاتیک و دینامیک آبخوان استفاده می‌شود. برای پهنه‌بندی نوع آبخوان با توجه به موقعیت و اطلاعات ساختاری آبخوان، کلاس‌بندی انجام می‌گیرد. با توجه به مقدار قابلیت انتقال که در آزمایش‌ها پمپاژ جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان تعیین می‌شود و ضخامت آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی در آبخوان تعیین می‌شود. به این منظور از تقسیم مقدار قابلیت انتقال بر ضخامت آبخوان، این پارامتر محاسبه

Table 2. Introducing GALDIT model parameters and their weighting

Class	Classification vulnerability	Parameters	Weight	High (10)	Medium (7.5)	Low (5)	Very low (2.5)
		G	1	Confined aquifer	Un-confined aquifer	Leak aquifer	Limited aquifer
>5	Low vulnerability	A	3	40>	10-40	5-10	>5
		L	4	>1	1-1.5	1.5-2	2 >
5-7.5	Medium vulnerability	D	4	>500	500-750	750-1000	1000 >
10<	High vulnerability	I	1	2 >	1.5-2	1-1.5	>1
		T	3	10 >	7.5-10	5-7.5	>5

پارامترها تعیین می‌شود. به منظور برآورد پارامتر شیب، از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استفاده و نقشه شیب در محیط GIS استخراج می‌شود. در جدول (۳) پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری و در جدول (۴) تقسیم‌بندی شاخص از نظر آسیب‌پذیری ارائه شده است.

شاخص GODS

شاخص GOD در سال ۱۹۸۷ توسط فاستر در انگلیس، که شامل سه پارامتر نوع آبخوان، لایه فوقانی آبخوان و عمق تا سطح ایستابی است ارائه شد (۱۴). این شاخص به اراضی کشاورزی بخصوص در بحث خاکشناسی توجهی ندارد، که این موضوع به عنوان یکی از کاستی‌ها این شاخص مطرح است. لذا به منظور رفع این کاستی آژانس محیط زیست انگلیس به دلیل نقش بیولوژیکی خاک در حذف یا رقیق کردن آلاینده‌ها، پارامتر چهارمی به نام حساسیت شست‌وشوی خاک به این شاخص اضافه شد. این پارامتر براساس بافت خاک و درصد مواد آلی تعیین می‌شود. لذا این شاخص به نام GODS شناخته می‌شود. جدول (۵) پارامترها و رتبه‌های این شاخص و جدول (۶) کلاس‌بندی آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد.

همچنین تهیه ابزاری کاربردی برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی نسبت به آلودگی از اهداف دیگر این روش می‌باشد. از روش دراستیک می‌توان برای تنظیم چگونگی انجام فعالیت‌ها در پایش آب زیرزمینی در یک منطقه استفاده کرد. در این روش برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی از شاخص آسیب‌پذیری استفاده می‌گردد که برای به دست آوردن آن به سه عامل وزن‌دهی، درجه‌بندی و تعیین محدوده پارامترهای هفت‌گانه دراستیک نیاز دارد. در این مدل هفت پارامتر عمق تا سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان جهت بررسی و آنالیز آسیب‌پذیری آبخوان مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر عمق تا سطح آب زیرزمینی براساس آمار سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان و پهنه‌بندی آن‌ها به دست می‌آید. با توجه به نقشه شیب، نفوذپذیری خاک و بارش در منطقه میزان تغذیه آبخوان در هر بخش محاسبه می‌شود. با استفاده از لوگ‌های حفاری در منطقه سه پارامتر خاک در لایه سطحی دو متری، محیط آبخوان و محیط غیراشباع استخراج می‌شود. سپس با استفاده از تیسن‌بندی لوگ‌های حفاری، پهنه‌بندی و رتبه‌بندی

Table 3. Introducing DRASTIC index parameters and their weighting

Depth G.W (m)		Recharge (mm)		Slope (%)		Hydraulic conductivity (m/day)		Aquifer media		Vados zone		Soil	
Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank
0.1-1.5	10	0-50.8	1	0-2	10	0.4-4.1	1	Volcanic rock	2	Confining layer	1	Gravel	10
1.5-4.6	9	50.8-101.6	3	2-6	9	4.1-12.3	2	Silt	3	Clay/Silt	3	Sand	9
4.6-9.1	7	101.6-177.8	6	6-12	5	12.3-28.7	4	Sandstone & shale	5	Shale	3	Pit	8
9.1-15.2	5	177.8-254	8	12-18	3	28.7-41	6	Sandstone	6	limestone	3	Sandy loam	7
15.2-22.8	3	>254	9	>18	1	41-82	8	Conglomerate	8	Sandstone	6	Loam sandy	6
22.8-30.4	2					>82	10	Sand and Gravel	8	Sand and Gravel	8	Loam	5
>30.4	1							Gravel					
								Basalt	9	Basalt	9	Silt-clay	4
								Karst	10	Sand and clay	10	Clay loam	3
												Impact clay	2
												Non infiltration	1
5	Weight	4	Weight	1	Weight	3	Weight	3	Weight	5	Weight	2	Weight

Table 4. DRASTIC index classification based on vulnerability

Classification Vulnerability	Class	Classification Vulnerability	Class
Can be ignored	46>	High vulnerability	137-184
Low vulnerability	47-92	Very high vulnerability	>185
Medium vulnerability	93-136		

Table 5. GODS vulnerability index parameters

Soil		Depth G.W (m)		Lithology		The aquifer's confinement	
Parameter	Rank	Parameter	Rank	Parameter	Rank	Parameter	Rank
Clay dense	0.5	> 50	0.6	Soil	0.4	None	0
Silty clay	0.6	20 - 50	0.7	Lichens	0.5	Artesian	0
Silt	0.7	5 - 20	0.8	Igneous and metamorphic rocks	0.6	Confined	0.2
Silty sand	0.7	< 5	0.9	Volcanic lava of the present time	0.7-0.8	Semi-confined	0.4
Clay seam and slit	0.8	Other depths	1	Karstic limestone	0.9	Free with a coating layer	0.6
Coarse sand	0.9			Hard rocks	1	Free	1
Low or no soil thickness	1						

Table 6. GODS vulnerability classification

Class	Classification vulnerability
0-0.1	Ignored
0.1-0.3	Low vulnerability
0.3-0.5	Medium vulnerability
0.5-0.7	High vulnerability
0.7-1	Very high vulnerability

شاخص SI

این شاخص در سال ۲۰۰۰ توسط ریپو (۱۹) با معرفی ۵ پارامتر جهت آسیب‌پذیری به‌خصوص در اراضی کشاورزی معرفی شد. عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص آبخوان، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، توپوگرافی و کاربری اراضی به‌عنوان پارامترهای ورودی جهت تعیین آسیب‌پذیری به‌کار برده می‌شود. رتبه‌بندی پارامترهای این شاخص مشابه شاخص SINTACS بوده و تنها تفاوت آن در پارامتر کاربری اراضی است که مطابق جدول (۹) رتبه‌بندی می‌شود. این تقسیم‌بندی براساس نقشه‌های کاربری اراضی منطقه تهیه و طبقه‌بندی می‌شود.

در جدول (۱۰) پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری و در جدول (۱۱) تقسیم‌بندی شاخص از نظر آسیب‌پذیری ارائه شده است.

برآورد پارامترهای شاخص

با توجه به تشریح پنج شاخص آسیب‌پذیری آبخوان

شاخص SINTACS

این شاخص براساس شاخص هم‌پوشانی استوار بوده و مشابه با روش دراستیک جهت آسیب‌پذیری آبخوان استفاده می‌شود با این تفاوت که در وزن‌ها و رتبه‌ها در این روش مشابه با آن نیست. این روش پارامترهای کنترل‌کننده حرکت آلاینده‌ها از سطح زمین به منطقه اشباع را تلفیق می‌کند. این روش برای اولین بار توسط سویتا (۱۳) و همکاران در سال ۱۹۹۰ ارائه شد. این روش دارای یک ساختار ترکیبی برای هفت پارامتر تشکیل‌دهنده آن است. پارامترهای تشکیل‌دهنده این مدل عبارتند از عمق تا سطح ایستابی، نفوذ، زون غیراشباع، پوشش سطحی خاک، محیط آبخوان، هدایت هیدرولیکی و شیب منطقه می‌باشند. در جدول (۷) پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری و در جدول (۸) تقسیم‌بندی شاخص از نظر آسیب‌پذیری ارائه شده است. نحوه محاسبه پارامترهای این شاخص مشابه شاخص آسیب‌پذیری دراستیک است.

ساحلی و از روش معکوس فاصله وزنی (IDW)^۴ برای لایه هدایت هیدرولیکی و ضخامت آبخوان و از روش تیسنبندی برای لایه‌های تغذیه آبخوان، خاک، محیط آبخوان، محیط غیراشباع استفاده می‌شود.

به‌منظور برآورد پارامترهای هر شاخص با استفاده از برنامه Spatial Analyst در نرم‌افزار ArcGIS 10.1 استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور درون‌یابی لایه‌ها از سه روش کریجینگ^۳ برای نقشه عمق تا سطح ایستابی و تأثیر کیفی آب در نوار

Table 7. Weight and ranking parameters of SINTACS index

Depth GW-S		Infiltration-I		Slope-S		Hydraulic conductivity-C		Aquifer media-A		Un- saturation zone-N		Soil-T	
Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank	Class	Rank
0-3	9	0-25	1	0-3	10	0-0.1	3	Massive shale	1-3	Enclosed layer	1	Thin or absent	10
3-5	8	25-50	3	3-5	9	0.1-0.86	4	Transformation / Ignition	2-3	Silt / Clay	2-6	Loamy sand	9
5-7	7	50-90	6	5-7	8	0.86-4.32	5	Igneous-metamorphic rocks	3-5	Shale	2-5	Sandy loam	7
7-10	6	90-125	8	7-10.5	7	4.32-8.64	6	Glaciers	4-6	Limestone	2-7	Gravel with loam	6
10-13	5	125>	10	10.5-13.5	6	8.64-43.2	7	Sandstone and layered limestone	5-9	Sandstone	4-8	loam	5
13-20	4			13.5-16.5	5	73.2-86.4	8	Massive sandstone	4-9	Sandstone and layered limestone	4-8	Clay loam	3
20-30	3			16.5-19.5	4	86.4-366.4	9	Mass lime	4-9	Sand and gravel with clay	4-8		
30-36	2			19.5-23	3	366.4>	10	Sand and gravel	4-9	Sand and gravel	6-9		
36>	1			23-27.5	2			Basalt	2-10	Basalt	2-10		
				27.5>	1			Karstic limestone	9-10	Karstic limestone	8-10		
5	weight	4	weight	1	weight	3	weight	3	weight	5	weight	2	weight

Table 8. SINTACS index classification by vulnerability

Class	SINTACS
26-51	Can be ignored
52-104	Low
105-156	Medium
157-210	High
210 <	Very high

Table 9. Classification of land-use

	Land use	Rating
Agricultural areas	Irrigation perimeters (annual crops, paddy fields)	90
	Permanent crops (orchards, vine yards)	70
	Heterogeneous agricultural areas	50
	Pastures and agro-forested areas	50
Artificial areas	Industrial waste discharges, landfills	100
	Quarries, shipyards, open-air mines	80
	Continuous urban areas, airports, harbors (rail) roads, areas with industrial or commercial activity, laid out green spaces	75
	Discontinuous urban areas	70
Natural areas	Aquatic environments (salt marshes, Salinas, intertidal zones)	50
	Forests and semi-natural zones	0
	Water bodies	0

Table 10. Weighting of SI index parameters

Parameter	Weight	Parameter	Weight
Slope	0.121	Depth GW	0.186
Land use	0.222	Net recharge	0.212
		Aquifer media	0.259

Table 11. SI classification by vulnerability

Class	Vulnerability class
30>	Ignored
30-40	Very low vulnerability
40-50	Low vulnerability
50-60	Medium to low vulnerability
60-70	Medium to high vulnerability
70-80	High vulnerability
80-90	Very high vulnerability

تعداد بیش‌تری از این شاخص‌ها به‌کار رفته و تعدادی تنها در یک شاخص به‌کار رفته است، لذا کلیه پارامترها محاسبه، رتبه‌دهی و وزن دهی می‌شوند. در شکل (۲) پارامترهای شاخص GALDIT در شکل (۳) پارامترهای تشکیل‌دهنده شاخص GODS و در شکل (۴) با توجه به یکسان‌بودن پارامترهای سه شاخص DRASTIC، SINTACS و SI این پارامترها محاسبه و برای هر شاخص براساس استاندارد آن رتبه‌دهی و وزن دهی گردید.

به این منظور لایه‌های اطلاعاتی عمق تا سطح ایستابی، تغذیه آبخوان، محیط خاک، محیط آبخوان، محیط غیراشباع، هدایت هیدرولیکی، شیب، فاصله از ساحل دریا، کاربری اراضی، لایه‌بندی آبخوان، نوع آبخوان، تأثیر کیفی آب در نوار ساحلی و ضخامت آبخوان برآورد شد. هر یک از این لایه‌ها در هر شاخص دارای یک وزن و کلاس‌بندی و رتبه‌بندی می‌باشند که به این منظور با استفاده از جدول‌های بخش قبل برای هر شاخص برآورد شد. بعضی از این پارامترها مثل عمق تا سطح ایستابی در

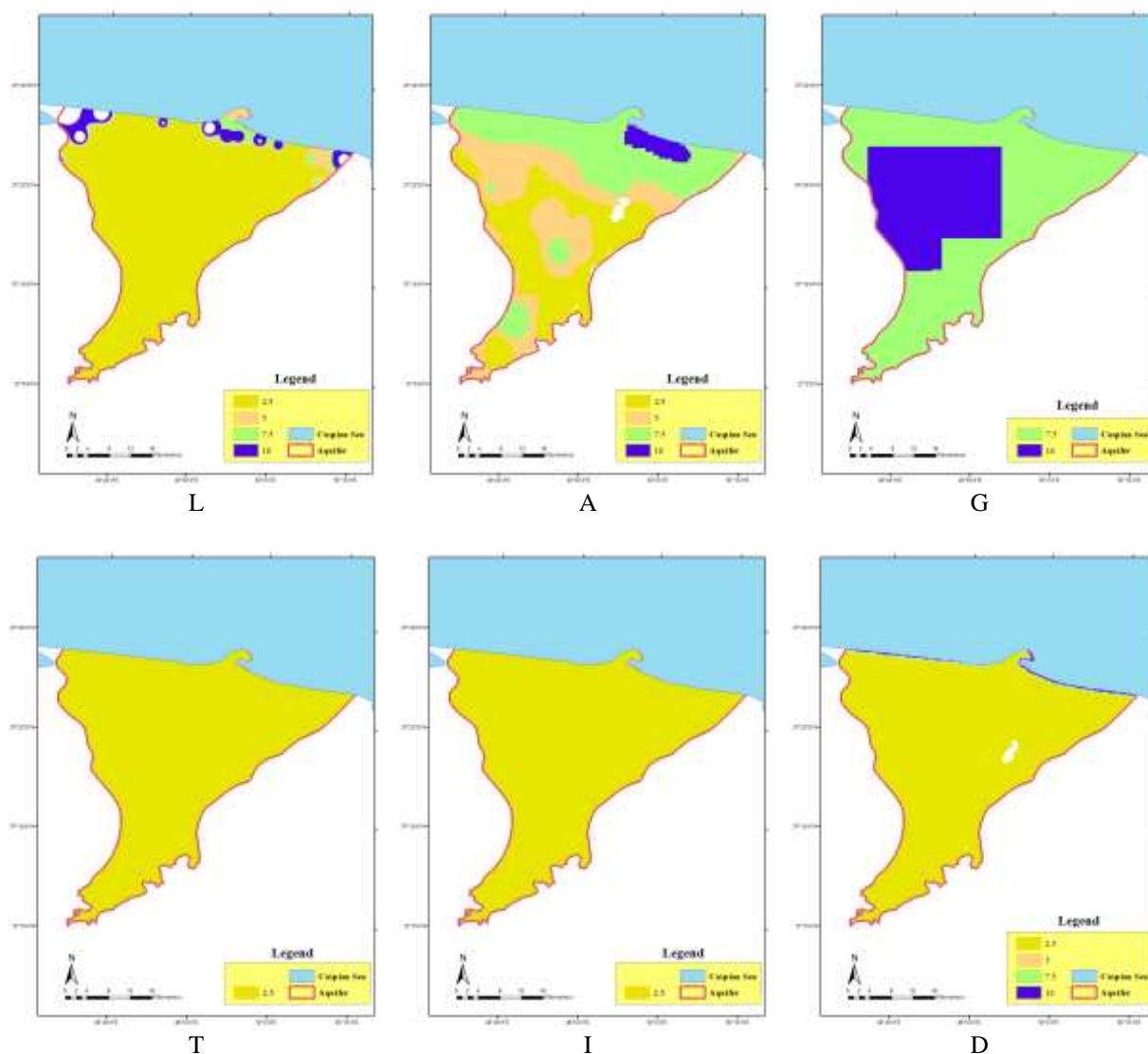


Figure 2. GALDIT vulnerability index parameters

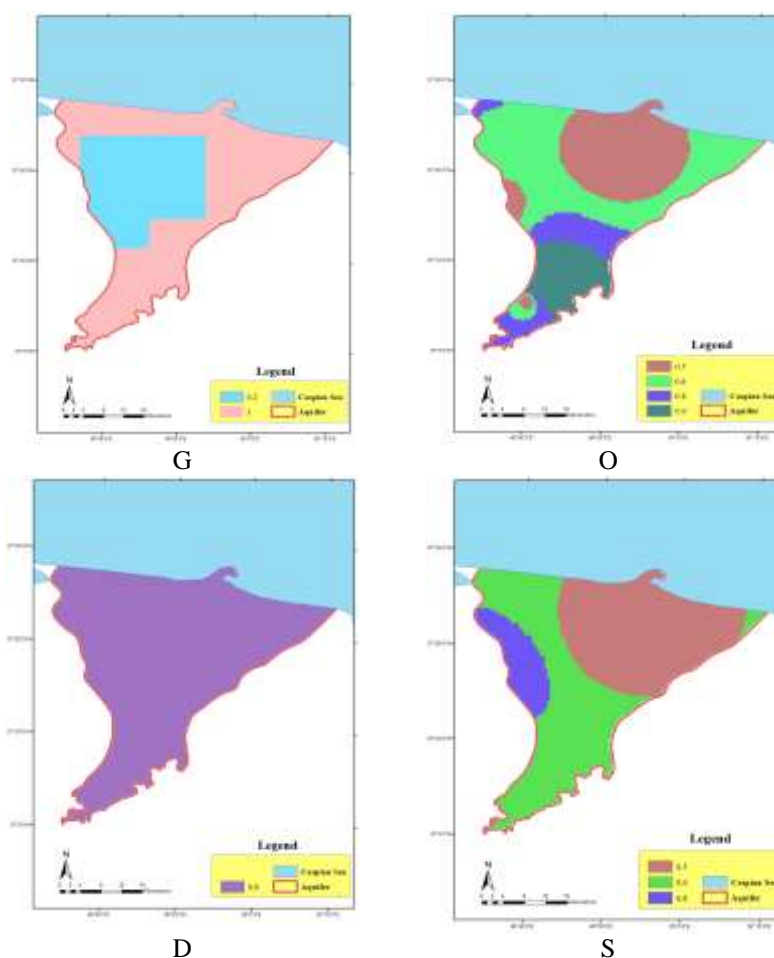


Figure 3. GODS vulnerability index parameters

واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری

به‌منظور بررسی و اثربخش شاخص‌های آسیب‌پذیری در منطقه آستانه-کوچصفهان از دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و شانون آنتروپی جهت ارزیابی وزن و رتبه‌های پارامترهای هر شاخص با در نظر گرفتن غلظت پارامتر مؤثر در محدوده منطقه مورد مطالعه شد (۱۵ و ۵). به‌منظور استفاده از این دو روش از تعداد ۳۰ پرسشنامه استفاده شد. بر این اساس، با استفاده از مقایسه زوجی بین نتایج ارائه‌شده در روش AHP، میزان وزن پارامتر با در نظر گرفتن ضریب ناسازگاری کمتر از ۰/۱ محاسبه شد. در روش آنتروپی پس از تشکیل ماتریس، میزان آنتروپی برای هر پارامتر شاخص آسیب‌پذیری محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

ارزیابی شاخص‌های آسیب‌پذیری

جهت برآورد شاخص از روش ضرب وزن هر لایه در رتبه لایه و در نهایت جمع کل آنها مطابق رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$Vul - Index = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (2)$$

در این رابطه W_i وزن هر پارامتر و I_i رتبه هر پارامتر است. با استفاده از روابط شاخص‌های آسیب‌پذیری آبخوان آستانه-کوچصفهان به‌دست آمد که در شکل‌های (۵) تا (۹) نشان داده شده است.

ارزیابی روش‌های مختلف آسیب‌پذیری آبخوان آبرفتی و ساحلی (منطقه مورد مطالعه: استان گیلان محدوده آستانه-کوچصفهان)

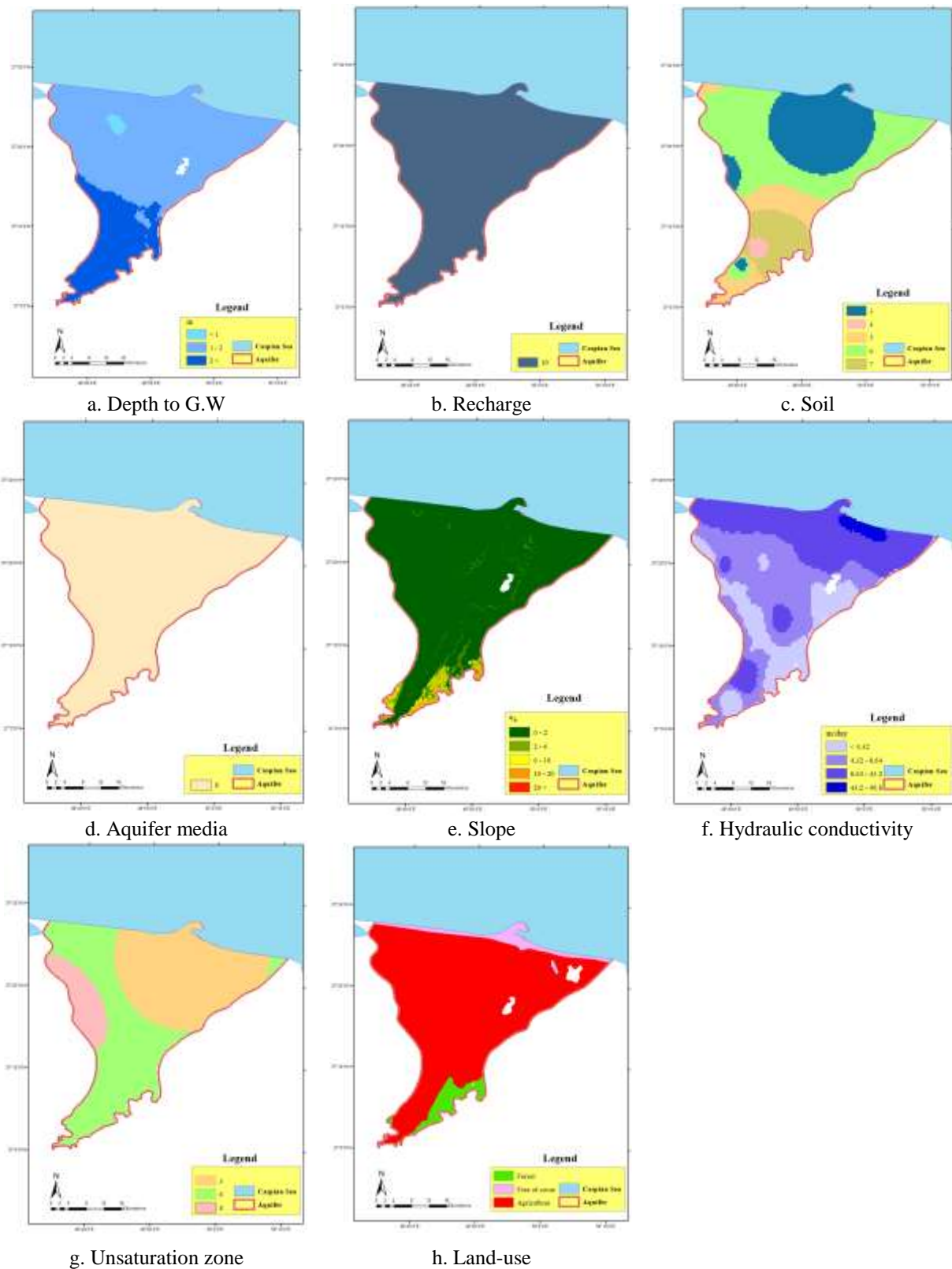


Figure 4. Parameters of DRASTIC, SINTACS and SI vulnerability index

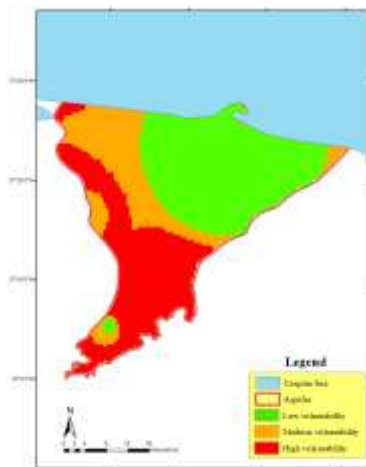


Figure 8. GODS index



Figure 5. SINTACS index



Figure 9. SI index



Figure 6. GALDIT index

در نهایت پس از محاسبه میزان انحراف برای هر پارامتر، وزن واسنجی شده برای هر پارامتر شاخص آسیب پذیری به دست می آید. پس از تعیین وزن های واسنجی شده، به منظور ارزیابی این وزن بین مقدار شاخص آسیب پذیری ارزیابی شده و مقدار غلظت پارامترهای کیفی از دو روش همبستگی اسپیرمن و مقدار میانگین مربعات خطا انجام گرفت. انتخاب پارامترهای کیفی براساس اثرگذاری هر کدام بر وضعیت کیفی منابع آب تعیین شده است (۱). حداکثر مقدار همبستگی و



Figure 7. Drastic index

Table 12. Weight of DRASTIC index after calibration using AHP and entropy methods

Parameters	Weight	Weight by Entropy	Weight by AHP
D	5	4.6	4.4
R	4	3	2.5
A	3	2.1	1.8
S	2	2	2.5
T	1	2.3	1.9
I	5	4.2	4.5
C	3	4.8	5.1

Table 13. Weight of SINTACS index after calibration using AHP and entropy methods

Parameters	Weight	Weight by Entropy	Weight by AHP
S	5	4.5	4.2
I	4	4.2	3.3
N	5	4.2	4.5
T	3	2.5	2.7
A	3	1.9	2.2
C	3	3.9	4.8
S	2	2.2	1.9

Table 14. Weight of SI index after calibration using AHP and Entropy method

Parameters	Weight by Entropy	Weight by AHP	Weight
Aquifer media	0.27	0.22	0.259
Slope	0.15	0.078	0.121
Land use	0.2	0.311	0.222
Depth to G.W	0.17	0.14	0.186
Recharge	0.28	0.245	0.212

Table 15. Weight correction scores of GALDIT index after calibration using AHP and entropy methods

Parameters	Weight	Weight by AHP	Weight by Entropy
G	1	1.7	2
A	3	5.4	4.7
L	4	1.5	1.8
D	4	1.5	1.4
I	1	0.8	1.2
T	2	2.4	2.8

Table 16. Weight of GODS index after calibration using AHP and entropy methods

Parameters	First Rank	Weight by Entropy	Weight by AHP
Type aquifer	0.2	0.5	0.6
	1	0.8	0.9
Soil	0.5	0.9	0.9
	0.6	0.75	0.8
	0.8	0.65	0.6
	0.9	0.55	0.4
The upper layer of the aquifer	0.5	0.85	0.8
	0.6	0.65	0.5
	0.8	0.35	0.2

حداقل مقدار خطا حاکی از واسنجی مناسب پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری به منظور انتخاب روش مناسب است. علت انتخاب این پارامترهای کیفی با توجه به نقش آن‌ها در میزان آسیب‌پذیری، شوری آب و آلودگی منابع آب زیرزمینی انجام گرفته است. نتایج استخراجی با توجه به ساحلی بودن منطقه، دارای بیش‌ترین میزان همبستگی و کم‌ترین میزان خطا با پارامتر کیفی TDS بوده و بر این اساس جهت واسنجی شاخص‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج واسنجی هر یک از پنج شاخص در جدول‌های (۱۲) تا (۱۶) ارائه شده است. بر این اساس وزن پارامترهای واسنجی شده به دو روش آنتروپی و AHP در شاخص‌های آسیب‌پذیری ارائه شده است.

پس از ارزیابی و واسنجی وزن و رتبه‌های شاخص‌های پنج‌گانه آسیب‌پذیری با دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی و آنتروپی، به منظور انتخاب روش مناسب از بین این دو روش از شاخص آماری همبستگی بین شاخص نهایی به دست آمده در دو روش با مقادیر پارامترهای کیفی استفاده شد. بر این اساس مطابق جدول (۱۷) نتایج با شاخص آسیب‌پذیری و غلظت TDS با روش همبستگی اسپیرمن ارائه شده است. بر این اساس هر روشی که بیش‌ترین میزان همبستگی را داشته باشد به عنوان روش مناسب برای واسنجی در نظر گرفته می‌شود.

نتایج به دست آمده از واسنجی وزن و رتبه‌های شاخص‌های آسیب‌پذیری نشان داد که روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) نسبت به روش آنتروپی دارای دقت بهتری بوده و می‌تواند آسیب‌پذیری آبخوان را بهتر نمایش دهد. بر این اساس و با توجه به نتایج واسنجی شده وزن و رتبه‌های به دست آمده با روش AHP، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان آستانه-کوچصفهان مطابق شکل‌های (۱۰) تا (۱۴) در محیط GIS تحلیل گردید.

Table 17. Correlation between calibrated vulnerability index and TDS concentration

Index	R ² - CI			R ² - NO ₃			R ² - TDS		
	Original	AHP	Entropy	Original	AHP	Entropy	Original	AHP	Entropy
GALDIT	0.39	0.48	0.47	0.035	0.25	0.24	0.58	0.72	0.67
DRASTIC	0.38	0.55	0.56	0.03	0.37	0.34	0.48	0.62	0.6
GODS	0.32	0.42	0.44	0.05	0.24	0.27	0.37	0.47	0.45
SI	0.29	0.51	0.53	0.07	0.28	0.3	0.44	0.57	0.55
SINTACS	0.32	0.53	0.55	0.04	0.29	0.29	0.47	0.63	0.58

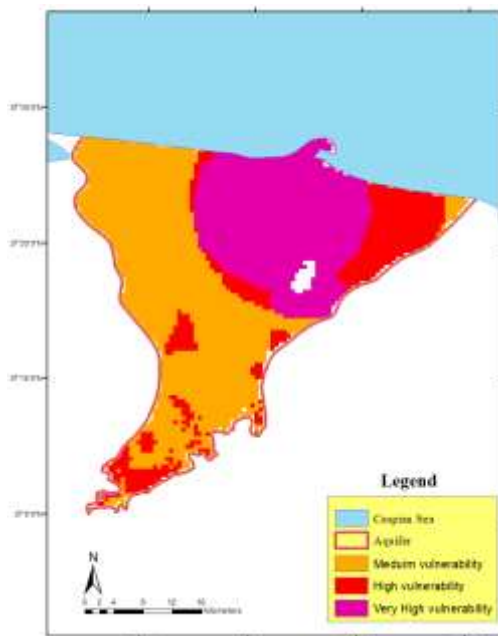


Figure 12. Calibrated SINTACS index

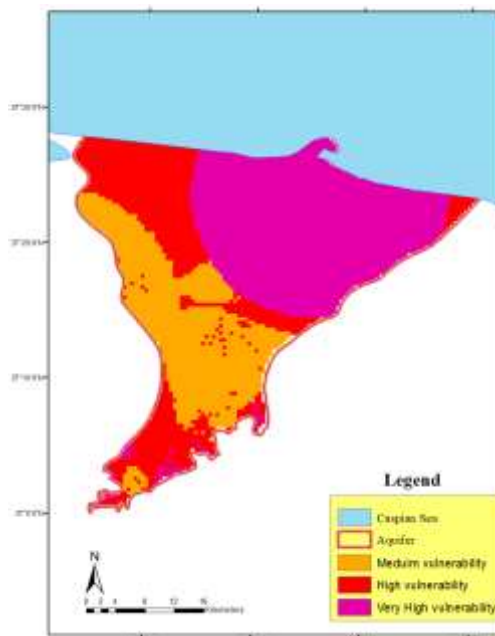


Figure 10. Calibrated DRASTIC index

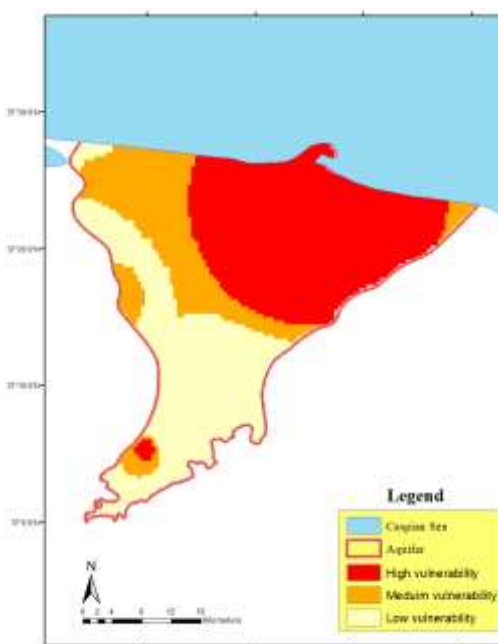


Figure 13. Calibrated GODS index

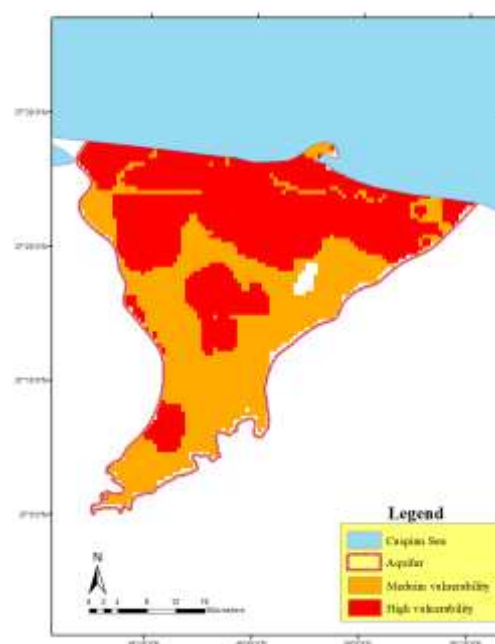


Figure 11. Calibrated GALDIT index

آسیب‌پذیری دراستیک در یک راستا بوده و با توجه به اعمال رتبه‌های متفاوت، تفاوت‌هایی را از نظر درصد سطح پوشش هر کلاس آسیب‌پذیری دارد. این موضوع حاکی از این است که تنها دو شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و SINTACS که از پارامترهای تشکیل‌دهنده مشترک و تنها با اعمال وزن و رتبه‌های متفاوت هستند، دارای کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد در آبخوان است. هم‌چنین تحلیل مکانی این دو شاخص نشان می‌دهد که به شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد، سطح بیشتری اختصاص پیدا کرده است و این موضوع در کلاس متوسط برای شاخص SINTACS وجود دارد. در این شاخص ۲۸ درصد آبخوان در کلاس خیلی زیاد، ۱۷ درصد در کلاس زیاد و ۵۵ درصد در کلاس متوسط قرار دارد. از نظر توزیع مکانی نیز شاخص SINTACS در بخش شمال‌شرقی دارای حداکثر میزان آسیب‌پذیری و در بخش‌های میانی دارای آسیب‌پذیری متوسط است. در شاخص آسیب‌پذیری GODS کلاس آسیب‌پذیری از کم تا زیاد در تغییر است، به‌گونه‌ای که ۳۹ درصد آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری کم، ۲۸ درصد در کلاس متوسط و ۳۳ درصد در کلاس زیاد قرار دارد. از نظر توزیع مکانی آسیب‌پذیری نیز بخش شمال‌شرقی دارای حداکثر میزان آسیب‌پذیری و بخش‌های میانی از میزان آسیب‌پذیری کاسته و به کلاس کم تبدیل می‌گردد. تحلیل وضعیت آسیب‌پذیری با روش SI نشان داد که ۸۹ درصد آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری زیاد قرار داشته و تنها ۱۱ درصد آبخوان در کلاس متوسط قرار دارد. توزیع مکانی کلاس‌بندی آسیب‌پذیری نیز نشان می‌دهد که تنها بخش جنوب‌شرقی آبخوان در کلاس متوسط قرار دارد. بر این اساس تحلیل مکانی هر پنج شاخص آسیب‌پذیری نشان داد که بخش شمال‌شرقی آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری بالا قرار داشته و بخش میانی و جنوبی

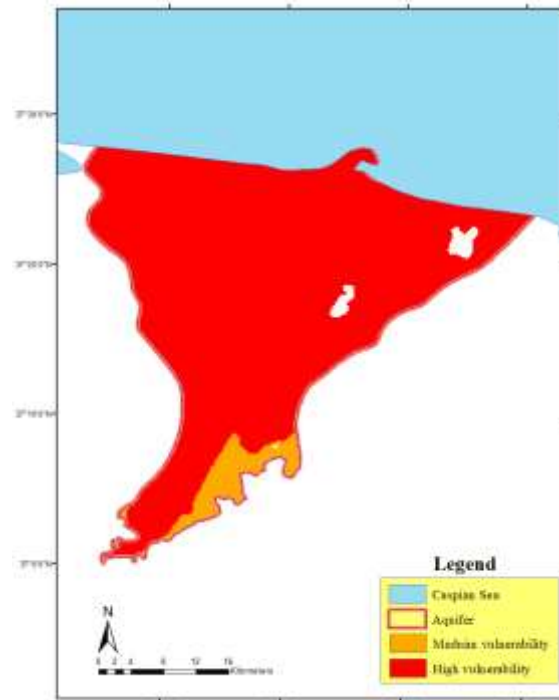


Figure 14. Calibrated SI index

بررسی وضعیت آسیب‌پذیری واسنجی‌شده نشان می‌دهد که شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در سه کلاس تقسیم‌بندی شده است. حدود ۴۶ درصد مساحت آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار دارد و این درصد برای کلاس زیاد ۲۶ درصد و برای کلاس متوسط ۲۸ درصد است. تحلیل وضعیت مکانی آسیب‌پذیری به روش دراستیک نیز نشان می‌دهد که بخش شمال‌شرقی آبخوان در حداکثر میزان آسیب‌پذیری قرار داشته و بخش‌های میانی آبخوان در کلاس متوسط قرار دارد. وضعیت آسیب‌پذیری با روش GALDIT نشان می‌دهد که بخش ساحلی آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری زیاد قرار داشته و بیش از ۴۱ درصد سطح آبخوان در این کلاس قرار دارد. این شاخص با توجه به در نظر گرفتن تأثیر آب شور از ناحیه دریا، در نوار ساحلی آسیب‌پذیری بیش‌تری نسبت به سایر بخش‌های آبخوان دارد. تحلیل آسیب‌پذیری به روش SINTACS نشان داد که این شاخص با شاخص

شاخص دراستیک و سیستکس که دارای پارامترهای تشکیل‌دهنده و ماهیت کلی هستند، اما شاخص دراستیک همبستگی بالاتری را با غلظت پارامترهای کیفی داشته و نسبت به شاخص سیستکس مناسب‌تر انتخاب می‌شود. بررسی شاخص GODS با توجه به در نظر گرفتن چهار فاکتور تشکیل‌دهنده نسبت به روش دراستیک از دقت کم‌تری برخوردار است. بررسی شاخص SI نشان داد که با توجه به در نظر گرفتن کاربری اراضی می‌تواند در تحلیل نتایج مناسب‌تر باشد، اما با توجه به تغییرات اندک کاربری اراضی این شاخص نمی‌تواند کارایی مناسبی داشته باشد. استفاده از کاربری اراضی در واسنجی روش‌های منتخب می‌تواند دقت برآورد آسیب‌پذیری را افزایش دهد. نتایج تحلیل شاخص GALDIT حاکی از بالاتر بودن میزان همبستگی بین مقادیر این شاخص با فاکتورهای کیفی را دارد. این شاخص مناسب آبخوان‌های ساحلی یا مناطق کویری که در معرض جبهه‌های آب شور قرار دارند بوده و اثر تجاوز جبهه‌های آب شور به طرف آبخوان را در نظر می‌گیرد. این شاخص ضمن در نظر داشتن عمق آب زیرزمینی که در شاخص دراستیک از وزن بالایی برخوردار است، میزان کیفیت پارامترهای کیفی را نیز در نظر دارد. به‌طور کلی پهنه‌بندی نتایج به‌دست‌آمده پس از واسنجی و میزان همبستگی به‌دست‌آمده بین پنج شاخص آسیب‌پذیری و غلظت TDS در آبخوان آستانه- کوچصفهان نشان داد که در آبخوان‌های ساحلی استفاده از شاخص آسیب‌پذیری GALDIT می‌تواند نتایج مناسب‌تری را نسبت به سایر شاخص‌ها داشته باشد. همچنین با توجه به ساحلی بودن این مناطق، پارامتر کیفی حساس جهت ارزیابی و واسنجی شاخص آسیب‌پذیری، TDS است که نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده این امکان وجود دارد که با در نظرگیری میزان احتمال ورود آلودگی به آبخوان با روش‌های مختلف واسنجی شده میزان ریسک محاسبه شود.

آبخوان با میزان آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد. تنوع کلاس‌های آسیب‌پذیری در شاخص آسیب‌پذیری دراستیک، SINTACS و GODS بیش‌تر بوده و تنها در شاخص GODS کلاس آسیب‌پذیری کم وجود دارد.

نتیجه‌گیری

بررسی وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان‌ها یکی از موضوع‌های مهم جهت مکان‌یابی و توسعه‌های مناطق مستعد می‌باشد. در این مطالعه ضمن معرفی پنج شاخص آسیب‌پذیری، وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان آستانه- کوچصفهان نیز مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های DRASTIC، SINTACS، GALDIT، GODS و SI با توجه به فاکتورهای تشکیل‌دهنده آن برای آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نزدیکی پارامترهای تشکیل‌دهنده هر شاخص و برآورد آسیب‌پذیری در منطقه انتخاب یک یا چند روش مناسب جهت تصمیم‌گیری مشکل می‌باشد. لذا در این مطالعه علاوه بر آنالیز حساسیت پارامترهای تشکیل‌دهنده، واسنجی جهت تصمیم‌گیری بهتر براساس فاکتورهای کیفی انجام گرفت. فاکتورهای کیفی متعددی بر شناسایی وضعیت آسیب‌پذیری یک آبخوان تأثیرگذار هستند. تحلیل همبستگی بین غلظت سدیم، کلر، نیترات و کل جامدات محلول جهت واسنجی استفاده و در نهایت غلظت TDS جهت واسنجی با توجه به همبستگی بالاتر نسبت به سایر پارامترهای کیفی انتخاب شد. پس از انتخاب نوع پارامتر کیفی جهت واسنجی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و شانون آنتروپی، وزن و رتبه‌های پنج شاخص مورد آنالیز قرار گرفت. شاخص ارتفاع آب زیرزمینی در شاخص GALDIT، هدایت هیدرولیکی در شاخص‌های دراستیک و سیستکس، کاربری اراضی در شاخص SI و پارامتر خاک در شاخص GODS بیش‌ترین حساسیت و وزن را دارا هستند. تحلیل نتایج نشان داد که با توجه به این که دو

پی‌نوشت‌ها

1. Margat
2. Analytic Hierarchy Process
3. Kriging
4. Inverse distance weighting

منابع

- زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند). مدیریت آب و آبیاری. ۵ (۲): ۱۳۹-۱۵۱.
7. Antonakos, A.K. & Lambrakis, N.J. (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(2-4), 288-304.
 8. Aller, L. (1985). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
 9. Bordbar, M., Neshat, A. & Javadi, S. (2019). A new hybrid framework for optimization and modification of groundwater vulnerability in coastal aquifer. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21808-21827.
 10. Bordbar, M., Neshat, A., Javadi, S., Pradhan, B. & Aghamohammadi, H. (2020). Meta-heuristic algorithms in optimizing GALDIT framework: A comparative study for coastal aquifer vulnerability assessment. *Journal of Hydrology*, 124768.
 11. Chachadi, A.G. & Lobo Ferreira, J.P. (2001). Seawater intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method. *Coastin*, 4, 7-9.
 12. Chachadi, A.G. & Lobo-Ferreira, J.P. (2001). Seawater intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. COASTIN: a coastal policy research newsletter, TERI, New Delhi.
 13. Civita, M. (1990). Legenda unificata per le Carte della vulnerabilita dei corpi idrici sotterranei/ Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps. Studi sulla Vulnerabilita degli Acquiferi, Pitagora Edit, Bologna.
 14. Foster, S.S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden, W. Van Waegeningh, H.G. (Eds.), *Vulnerability of Soils and Groundwater to Pollution*. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, *Proceedings and Information*, 38, 69-86.
 15. Gadre, S.R. (1984). Information entropy and Thomas-Fermi theory. *Physical Review A*, 30(1), p.620.
 16. Javadi, S., Kavehkar, N., Mohammadi, K., Khodadi, A. & Kahawita, K. (2011b). Calibration DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical method to assess groundwater vulnerability. *Water International*, 36(6), 719-732.
۱. استواری ی.، بیگی هرچگانی ح. و داودیان ع.ر. (۱۳۹۱). بررسی تغییرات مکانی نترات در آب زیرزمینی دشت لردگان. مدیریت آب و آبیاری. ۲ (۱): ۵۵-۶۷.
 ۲. جوادی، س.، و کاردان مقدم، ح. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی سه بعدی تهاجم جبهه‌های آب شور در آبخوان‌های کویری با استفاده از مدل SEAWAT. مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۱): ۱۲۹-۱۴۲.
 ۳. جوانشیر گ.، ندیری ع.، صادق فام س. و عباس نوین پور ا. (۱۳۹۵). ارائه روشی جدید به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت مغان برمبنای ترکیب روش‌های دراستیک، سینتکس و اس‌آی. اکوهیدرولوژی. ۳ (۴): ۴۹۱-۵۰۳.
 ۴. سلطانی ش.، اصغری مقدم ا.، برزگر ر. و کاظمیان ن. (۱۳۹۵). ارزیابی غلظت نترات و آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با روش‌های GODS و AVI (مطالعه موردی: دشت کردکندی-دوزدوزان، آذربایجان شرقی) اکوهیدرولوژی. ۳ (۴): ۵۱۷-۵۳۱.
 ۵. کاردان مقدم، ح.، و جوادی، س. (۱۳۹۴). ارزیابی آسیب‌پذیری سفره ساحلی با استفاده از روش GALDIT و واسنجی آن با روش AHP. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۳ (۲): ۱۶۳-۱۷۷.
 ۶. کاردان مقدم، ح.، و روزبهانی، ع. (۱۳۹۴). ارزیابی مدل شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی ماهانه سطح آب

17. Javadi, S., Kavehkar, N., Mousavizadeh, M.H. & Mohammadi, K. (2011a). Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13(2), 239-249.
18. Kardan Moghaddam, H., Jafari, F. & Javadi, S. (2017). Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 137-146.
19. Ribeiro, L. (2000). Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade, ERSHA-CVRM, 8p.