مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۱ ■ شماره ٤ ■ زمستان ۱٤۰۰
صفحه‌های ۷۵۱-۷۳۹
DOI: 10.22059/jwim.2022.326696.900

مقاله پژوهشی:

استفاده از دو رویکرد آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه برای شناسایی پتانسیل‌های توسعه بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی

فاطمه ریاحی چلوانی[۱]، حسن وقارفرد[۲*]، پیمان دانشکار آراسته[۳]، حمید کاردان مقدم[۴]
۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، قزوین، ایران.
۴. استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

چکیده
یکی از ابزارهای مناسب برای شناخت وضعیت توسعه در منابع آب زیرزمینی استفاده از مفهوم آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی است. از دیدگاه نظری، مفهوم آسیب‌پذیری آبخوان بر دو گونه آسیب‌پذیری ویژه و آسیب‌پذیری ذاتی بوده که بر پایه خصوصیات هیدروژئولوژیکی و آلودگی آبخوان تعریف شده است. در این پژوهش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان سرخون در استان هرمزگان، از شاخص آسیب‌پذیری دراستیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی و از شاخص کیفی GQI، برای ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آبخوان استفاده شد. نتایج طبقه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان نشان داد که شاخص آسیب‌پذیری ذاتی در بخش جنوبی آبخوان دارای آسیب‌پذیری زیاد بوده و بیش‌تر گستره آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری متوسط است. از سویی، براساس پارامترهای کیفی در چاه‌های منطقه شاخص GQI مورد سنجش و آنالیز قرار گرفت. وزن‌دهی این شاخص نشان داد که پارامتر TDS در منابع آب زیرزمینی دارای بیش‌ترین اهمیت است. پهنه‌بندی کیفی در سطح آبخوان سرخون بیانگر کاهش شاخص و بیان دیگر افزایش غلظت املاح در بخش‌های مرکزی و خروجی آبخوان است. در پایان با نرمال‌سازی دو شاخص آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان و آسیب‌پذیری ویژه، شاخص آسیب‌پذیری آبخوان سرخون ارزیابی و محاسبه شد. برآورد شاخص آسیب‌پذیری نشان داد که میزان آسیب‌پذیری در بخش خروجی آبخوان افزایش داشته و این موضوع با جریان آب زیرزمینی نیز همخوانی دارد. به‌منظور ارزیابی دقت شاخص آسیب‌پذیری کل، از همبستگی این شاخص با غلظت نیترات استفاده شد که نتایج حاکی از دقت آماری ۷۲ درصد است.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری ذاتی، آسیب‌پذیری ویژه، شاخص GQI، TDS.

Using two inherent and specific vulnerability approaches to identify potentials for the development of groundwater resources

Fateme Riahi[1], Hasan Vagharfard[2*], Peyman Daneshkar Araste[3], Hamid Kardan Moghaddam[4]
1. Ph.D. of Watershed Engineering, Factually of Agriculture and Natural Resource, Hormozgan University, Bandarabas, Iran
2. Associate Professor of Watershed , Factually of Agriculture and Natural Resource, Hormozgan University, Hormozgan, Iran
3. Associate Professor of Water Engineering , Emam Khomeini of Ghazvin International University, Ghazvin, Iran
4. Assistant Professor, Water Research Institute Tehran, Iran
Received: July, 26, 2021 Accepted: January, 06, 2022

Abstract
One of the appropriate tools to understand the state of development in groundwater resources is to use the concept of vulnerability of groundwater resources. From a theoretical point of view, the concept of aquifer vulnerability is based on two types of special vulnerability and intrinsic vulnerability, which is defined based on hydrogeological characteristics and aquifer pollution. In this study, to assess the vulnerability of Sarkhoon aquifer in Hormozgan province, the Drastic vulnerability index was used to assess the inherent vulnerability and the GQI quality index was used to assess the specific vulnerability of the aquifer. The results of aquifer vulnerability classification showed that the intrinsic vulnerability index in the southern part of the aquifer has a high vulnerability and most of the aquifer range is in the medium vulnerability class. On the other hand, based on quality parameters in wells in the region, GQI index was measured and analyzed. The weighting of this index showed that the TDS parameter is the most important in groundwater resources. Qualitative zoning at the level of the Sarkhon aquifer indicates a decrease in the index and another expression is an increase in the concentration of solutes in the central parts and the outlet of the aquifer. Finally, by normalizing the two indicators of intrinsic aquifer vulnerability and special vulnerability, the Sarkhon aquifer vulnerability index was evaluated and calculated. Vulnerability index estimation showed that the level of vulnerability has increased in the aquifer outlet and this is also consistent with groundwater flow. In order to evaluate the accuracy of the total vulnerability index, the correlation of this index with nitrate concentration was used, which the results indicate a statistical accuracy of 72%.

Keywords: GQI index, Intrinsic vulnerability, Specific vulnerability, TDS.

* نویسنده مسئول Email: hvaghar52@yahoo.com

مقدمه

تنش‌های اقلیمی، مدیریتی، حجم بالای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و ورود آلاینده‌ها سبب شده تا افزون بر بحران در کمیت منابع آب زیرزمینی، وضعیت کیفیت آبخوان‌ها نیز دچار چالش شود (Javadi *et al*., 2018; Kardan moghaddam *et al*., 2017). بحران کیفی در منابع آب زیرزمینی با توجه به رویکردهای محیط زیست، نقش مدیریت بهره‌برداری را مشهود ساخته است. یکی از ابزارهای ارزیابی وضعیت کیفی آبخوان برای توسعه، استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری است. آسیب‌پذیری به مفهوم احتمال ورود آلودگی به منابع آب است و این تعریف، از دو دیدگاه آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه در منابع آب زیرزمینی قابل تعمیم است (Kardan Moghaddam *et al*., 2020). آسیب‌پذیری ذاتی، با نگرش به ویژگی‌های آبخوان و خصوصیات هیدروژئولوژیکی، وضعیت آبخوان را موردبررسی قرار می‌دهد (Javadi *et al*., 2011). آسیب‌پذیری ویژه آبخوان، با درنظرگرفتن آلاینده‌ها و آلودگی‌های ناشی از کنش‌های انسانی معرفی می‌شود. این تفکیک مفاهیم در آسیب‌پذیری دوسویه بوده به‌گونه‌ای که آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان وابسته به ویژگی‌های زمین-آب‌شناسی و آسیب‌پذیری ویژه برپایه پویایی کنش‌های بشری است. از سویی، آسیب‌پذیری ذاتی با گذشت زمان کم و بیش مانا بوده ولی آسیب‌پذیری ویژه با نگرش به ذات آن، متغیر در زمان است. ازآنجاکه آسیب‌پذیری ویژه مستقل بوده، پیوندآن با آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان می‌تواند ارزیابی مناسب‌تری را از وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان برای توسعه را ارائه دهد. پژوهش‌های فراوانی در زمینه استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری در آبخوان‌ها انجام گرفته است که در آن‌ها علاوه بر تعیین میزان آسیب‌پذیری، استفاده از رویکردها گوناگون برای بهبود شاخص انجام گرفته است (Kardan Moghaddam *et al*., 2017). یکی از مهم‌ترین رویکردهای بهبود شاخص آسیب‌پذیری، واسنجی وزن و رتبه‌های شاخص با استفاده از ابزارهای مختلف آماری، بهینه‌سازی و تلفیقی بوده است (Bordbar *et al*., 2019). واسنجی بر پایه یک یا چند پارامتر کیفی استوار بوده و استفاده از ذات پارامترهای کیفی در تعیین آسیب‌پذیری موردبررسی قرار نگرفته است (Saadati *et al*., 2020). نتایج پژوهش Javadi *et al*. (2018) نشان داد با استفاده از رویکرد خوشه‌بندی سه پارامتر کیفی نیترات، آرسنیک و TDS را در پنج کلاس آبخوان قزوین برای واسنجی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک به‌کار بردند. هم‌چنین Arya *et al*. (2020) با استفاده پهنه‌بندی غلظت نیترات، Wang *et al*. (2020) با رویکرد استفاده از روش آنتروپی و Torkashvand *et al*. (2021) با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های تصمیم‌گیری در بهبود نتایج شاخص آسیب‌پذیری دراستیک را موردبررسی قرار دادند.

در این پژوهش، به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت سرخون با رویکرد تلفیق آسیب‌پذیری ذاتی و آسیب‌پذیری ویژه آبخوان پرداخته شده است. این آبخوان با وضعیت نامناسب تغذیه روبه‌رو بوده و از سویی، حجم بالایی از آلودگی ناشی از پساب آب شیرین‌کن‌های مورد بهره‌برداری، جریانات سطحی رودخانه شور در منطقه و تغذیه ناشی از جریانات آب برگشتی سبب شده آبخوان از دید کمی و کیفی در معرض خطر باشد. از این‌رو، پیوند دو مفهوم آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه می‌تواند برآورد درستی برای توسعه منطقه ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

روش تحقیق

این پژوهش در سه بخش اصلی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان که تلفیقی از دو شاخص آسیب‌پذیری ذاتی و

ویژه آبخوان است موردبررسی قرار گرفته است. در بخش اول برای آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، از شاخص آسیب‌پذیری دراستیک که به‌وسیله آلر در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است، استفاده می‌شود (Aller, 1985). پس از برآورد پارامترهای تشکیل‌دهنده، مقدار شاخص آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان محاسبه می‌شود. در بخش دوم با توجه به موقعیت چاه‌های کیفی منطقه نُه پارامتر کیفی در منطقه برای تحلیل آلودگی انتخاب می‌شود. در نهایت با استفاده از شاخص GQI، شاخص آسیب‌پذیری ویژه آبخوان محاسبه می‌شود. بخش سوم با تلفیق دو شاخص آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه در آبخوان، شاخص آسیب‌پذیری کل آبخوان محاسبه و آبخوان جهت شناخت پتانسیل‌های توسعه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل (۱) مراحل پژوهش را نشان می‌دهد.

منطقه موردمطالعه

محدوده مطالعاتی سرخون با وسعت ۹۹۹/۱ کیلومترمربع در حوضه آبریز رودخانه‌های بین بندرعباس تا سدیج قرار دارد. این محدوده دارای سه دشت مجزا با سه آبخوان است که دشت سرخون با وسعت ۱۰۶/۲ کیلومترمربع، دشت گنو با وسعت ۹۷/۳ کیلومترمربع و دشت چوچ و دهنو با وسعت ۲۶۳ کیلومترمربع می‌باشد. آبخوان سرخون در بخش مرکزی محدوده واقع شده است که حالت کاسه‌ای شکل داشته و جریان آب زیرزمینی از بخش غربی به طرف مرکز در حرکت بوده و در بخش جنوبی بخش خروجی زیرزمینی این آبخوان است. منابع آب زیرزمینی موجود در محدوده مطالعاتی سرخون شامل ۴۰۳ حلقه چاه و شش دهنه چشمه است که تخلیه سالیانه آن‌ها براساس بیلان منابع و مصارف در سال ۱۳۹۵ به‌ترتیب ۳۱/۴ و ۵/۷ میلیون مترمکعب است (Ministry of Energy, 2015). از تعداد فوق ۳۱۰ حلقه چاه و پنج رشته قنات در آبخوان سرخون قرار دارد که حجمی بالغ بر ۲۸ میلیون مترمکعب آب برداشت می‌شود. میزان حجم آب برداشت‌شده در آبخوان سرخون، ۲۲/۸۹ میلیون مترمکعب جهت مصارف کشاورزی، ۷/۰۲ میلیون مترمکعب جهت مصارف شرب و ۱/۴۱ میلیون مترمکعب جهت مصارف صنعت بهره‌برداری می‌شود (Ministry of Energy, 2015). در این مطالعه با منظور آنالیز کیفی تعداد ۲۰ حلقه چاه بهره‌برداری آنالیز کیفی شد که در شکل (۲) موقعیت آن‌ها ارائه شده است.

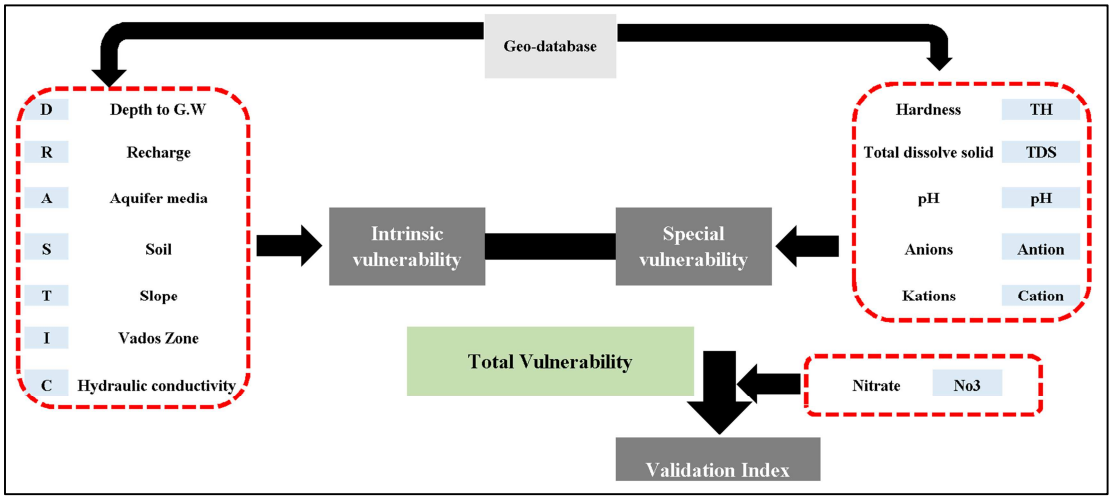

Figure 1. Stage of this study

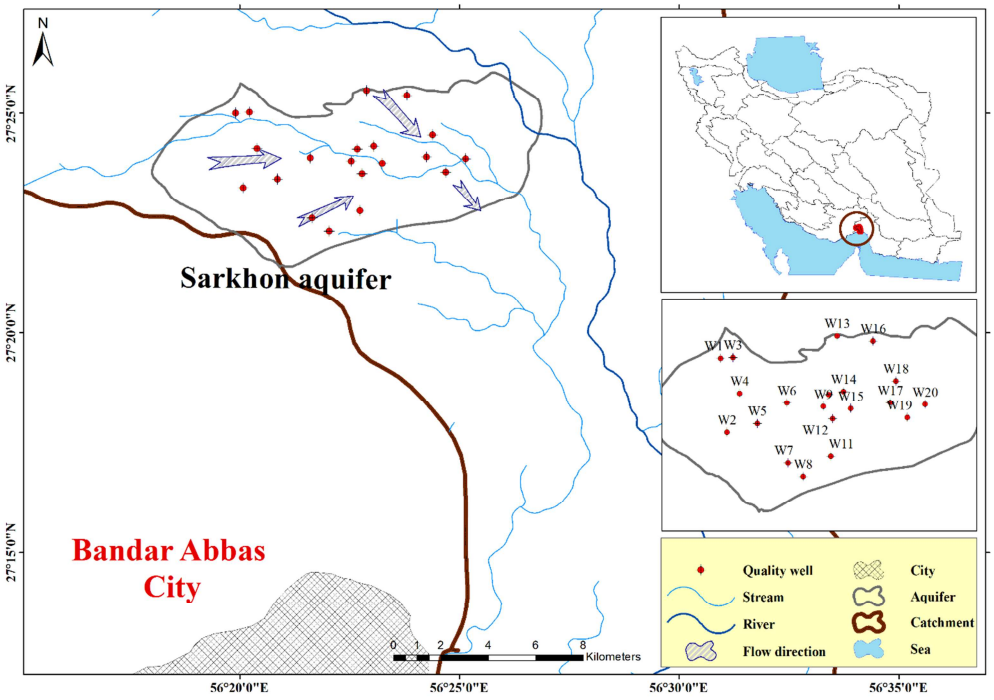

Figure 2. Case study

آسیب‌پذیری

واژه آسیب‌پذیری در هیدروژئولوژی برای نخستین بار به‌وسیله مارگات در سال ۱۹۷۰ مورداستفاده قرار گرفته است (Kardan Moghaddam *et al.*, 2020). وی آسیب‌پذیری آبخوان را توانایی نفوذ و پخش آلودگی از سطح زمین به سطح آب مخازن زیرزمینی در شرایط طبیعی تعریف می‌کند (Aller, 1985). به هر روی، در سال‌های بعد، تعاریف زیادی از این جستار ارائه شد که روی‌هم‌رفته می توان آسیب‌پذیری را شانس رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سامانه آب زیرزمینی پس از تولید در برخی جایگاه‌ها در سطح زمین دانست. آسیب‌پذیری از دید مفهومی به دو دسته ذاتی و ویژه رده‌بندی شده است. که در آسیب‌پذیری ذاتی نوع آسیب‌پذیری به ویژگی‌های آبخوان (هدایت هیدرولیکی، سیب آبی و خلل و فرج و تنش‌های وارده به سیستم تغذیه، واکنش با آب سطحی، زمان حرکت در منطقه اشباع و نیمه‌اشباع و بده پمپاژ) بستگی دارد و به منابع آلودگی ناشی کنش‌های انسانی وابسته نیست ندارد. در آسیب‌پذیری ویژه ،آلاینده‌ای خاص یا گروهی از آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های ناشی از واکنش آلاینده‌ها با اجزای مختلف آسیب‌پذیری ذاتی، به‌وجود می‌آیند (Javadi *et al.*, 2017).

شاخص آسیب‌پذیری ذاتی

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک از 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 تشکیل شده است. با پهنه‌بندی عمق آب زیرزمینی با روش کریجینگ پارامتر عمق تا سطح آب زیرزمینی آبخوان محاسبه و رتبه‌بندی شد. پارامتر تغذیه براساس تلفیق سه نقشه شیب، نفوذپذیری خاک

و بارش در منطقه تعیین و رتبه‌بندی شد. پارامتر تغذیه آبخوان براساس گزارش‌های بیلان و میزان درصد نفوذ برای بارش، رواناب و آب برگشتی در سطح منطقه استخراج شد. مقدار عددی تغذیه خالص آبخوان براساس جدول (۱) رتبه‌بندی می‌شود. با استفاده از لوگ‌های حفاری در منطقه سه پارامتر خاک در لایه سطحی دو متری، محیط آبخوان و محیط غیراشباع در این نقاط تعیین و براساس نقشه‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی، پهنه‌بندی این سه پارامتر شاخص جهت رتبه‌بندی انجام گرفت. دو متر ابتدایی لوگ‌های حفاری جهت تعیین جنس خاک، جنس و ساختار منطقه غیراشباع برای تحلیل و رتبه‌بندی منطقه غیراشباع آبخوان و ساختار کل لوگ حفاری برای محیط آبخوان در نظر گرفته و مورد استفاده قرار گرفت. سه پارامتر محیط آبخوان، خاک و محیط غیراشباع با توجه به جنس تعیین‌شده در لوگ‌های حفاری تعیین و براساس جنس تعیین‌شده در جدول (۱) رتبه‌دهی شدند. پارامتر شیب با استفاده از الگوریتم D8 از مدل رقومی ارتفاع تعیین و رتبه‌بندی شد. با محاسبه نسبت بین قابلیت انتقال و ضخامت آبخوان نیز پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان به‌دست می‌آید. مقدار قابلیت انتقال براساس آزمایش‌های پمپاژ تعیین شد. نتایج آزمایش پمپاژ (آزمایش پمپاژ با دبی متغیر) براساس اطلاعات اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان استخراج و مورد تحلیل قرار گرفت. در جدول (۱) وزن و رتبه‌های شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و در جدول (۲) تقسیم‌بندی آسیب‌پذیری ارائه شده است.

بر این اساس پارامترهای این شاخص به‌صورت شکل (۳) محاسبه شده است.

Table 1. Introducing DRASTIC index parameters and their weighting (Aller *et al*, 1985)

Depth G.W (m)		Recharge (mm)		Slope (%)		Hydraulic conductivity (m/day)		Aquifer media		Vadose 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							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 2. 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		

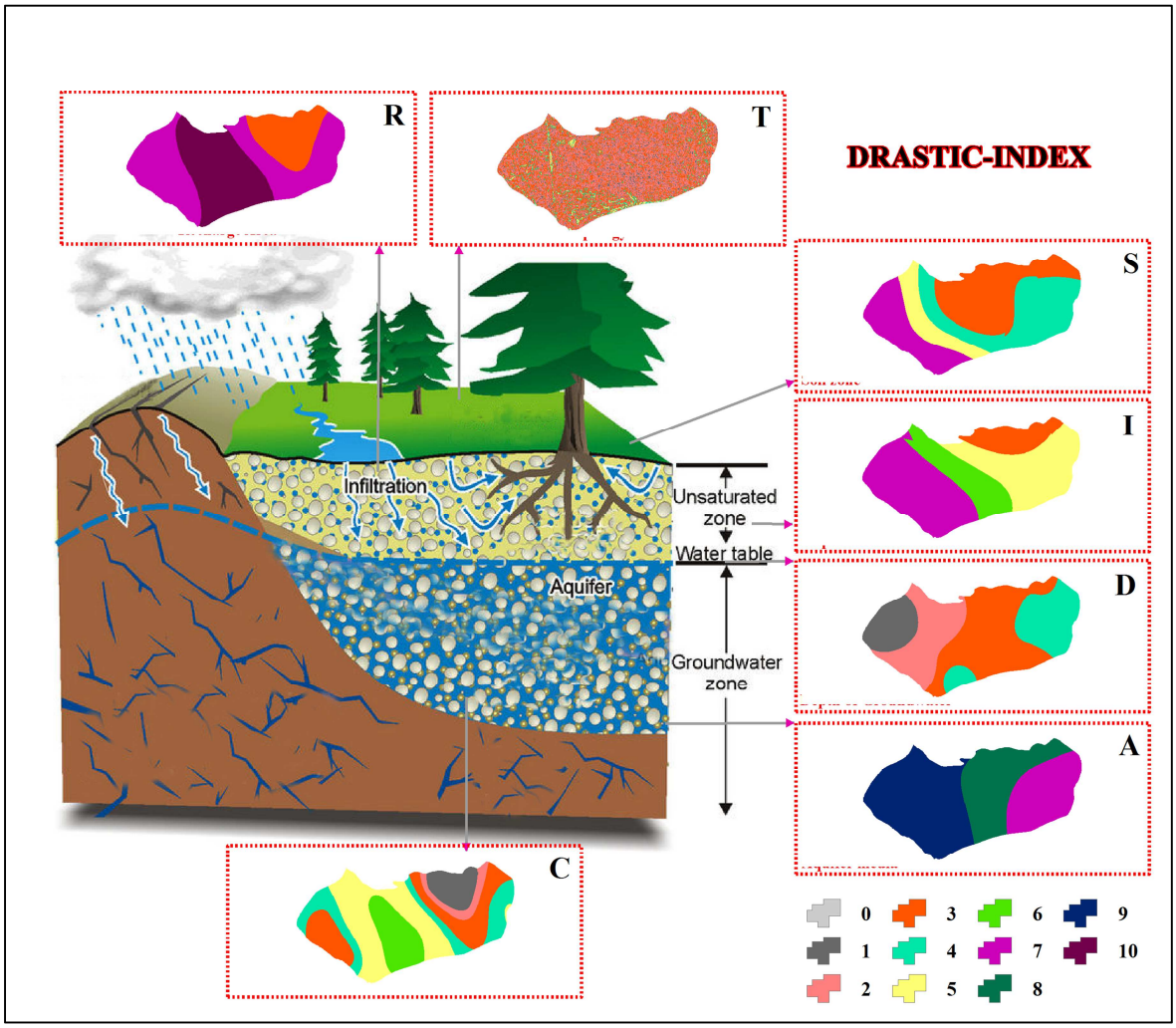

Figure 3. Vulnerability index parameters in Sarkhon aquifer

شاخص آسیب‌پذیری ویژه

آسیب‌پذیری ویژه آبخوان مبتنی بر نوع آلودگی منابع آب زیرزمینی تعریف می‌شود. این نوع آسیب‌پذیری برگرفته از دو منشأ فعالیت‌های انسانی یا منابع تغذیه‌کننده عبوری از سازندهای زمین‌شناسی است. نوع سازندهای زمین‌شناسی در تغییر کیفیت آب بیش‌تر در مناطقی که جریانات سطحی از آبخوان عبور می‌کنند تأثیرگذار بوده اما فعالیت‌های انسانی که سبب تغییر کیفیت آب یا انتقال آلودگی در همه آبخوان می‌شود (Javadi *et al.*, 2019). با توجه به ماهیت آبخوان سرخون و تأثیر نقش فعالیت‌های انسانی بر کیفیت آبخوان، پارامترهای مختلف کیفی آب زیرزمینی در این منطقه مورد آنالیز و تحلیل قرار گرفت. تعداد ۲۰ حلقه چاه منطقه با اندازه‌گیری نُه پارامتر TDS، pH، Na، Ca، Mg، So$_4$، Cl، Hco$_3$ و TH جهت آنالیز انتخاب شد که توسط شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان نمونه‌برداری آنالیز نتایج انجام شد. برای برگزینی و طبقه‌بندی پارامترهای کیفی مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان از شاخص کیفیت آب زیرزمینی GQI استفاده شد. این شاخص به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$GQI = 100 - \left(\frac{r_1w_1 + r_2w_2 + \cdots + r_nw_n}{N}\right) \qquad (۱)$$

در این معادله، r میزان رتبه هر پارامتر کیفی (۱ تا ۱۰)، w وزن نسبی پارامترها و N تعداد کل پارامترهای استفاده شده است. وزن نسبی هر پارامتر، به مقدار میانگین رتبه‌بندی (r) آن‌ها ارتباط دارد. در مورد پارامترهایی که اثرات بالا بالقوه دارند (مثل نیترات) از رابطه (mean r+2) با شرط r≤۸ استفاده می‌شود. این شاخص بیانگر ترکیب خطی میانگین پارامترهای کیفی در نظر گرفته شده در آبخوان است. وزن داده‌شده هر پارامتر بیان‌کننده اهمیت نسبی آن پارامتر در آبخوان است. افزایش میزان وزن بیانگر اهمیت نسبی آن پارامتر است. در نهایت با تقسیم حاصل ضرب رتبه هر پارامتر در وزن آن بر تعداد کل پارامترها، شاخص کیفیت آب زیرزمینی به‌صورت مقدار بین صفر تا ۱۰۰ به‌دست می‌آید. این محاسبات باعث می‌شود تا تأثیر پارامترهای به‌صورت مجزا کاهش یابد. بالابودن مقدار شاخص بیانگر کیفیت مطلوب و کاهش این شاخص بیانگر نامطلوب بودن کیفیت آب زیرزمینی است. موقعیت چاه‌های کیفی در شکل (۲) و تحلیل آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی آبخوان سرخون براساس نمونه‌برداری انجام گرفته در سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ در جدول (۳) ارائه شده است.

فرایند محاسبه شاخص GQI در سه مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول نقشه اولیه I محاسبه می‌شود. براین اساس پهنه‌بندی غلظت هر پارامتر با روش درون‌یابی کریجینگ که با روش اعتبارسنجی متقابل صحت‌سنجی شده بود، ارزیابی می‌شود. این روش مبتنی بر میانگین وزنی هر پارامتر است. در مرحله دوم برای ارائه داده‌های به‌صورت مقدار نرم مکانی، غلظت اندازه‌گیری شده در هر سلول (Y) در نقشه اولیه به مقدار استاندارد مطلوب آن مطابق استاندارد WHO (X) با استفاده از رابطه (۲) نرمالالیز می‌شود.

$$C = \frac{Y-X}{Y+X} \qquad (۲)$$

نقشه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای هر سلول، یک مقدار شاخص آلودگی بین مقدار ۱- تا ۱+ وجود دارد. نقشه بیانگر شاخص آلودگی است که به عنوان نسبت بین غلظت اندازه‌گیری‌شده آلاینده و حداکثر سطح آلاینده قابل پذیرش محاسبه شده است. در مرحله سوم، شاخص آلودگی (نقشه مرحله دوم) به یک نقشه رتبه‌بندی با محدوده ۱ تا ۱۰ تبدیل می‌شود. رتبه ۱ نشان‌دهنده کم‌ترین تأثیر و رتبه ۱۰ حداکثر تأثیر را نشان می‌دهد. در نقشه جدید، کم‌ترین سطح شاخص آلودگی (۱-) برابر با مقدار ۱ در نظر گرفته شده و بیش‌ترین مقدار (۱+) برابر ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. براین اساس با استفاده از تابع چندجمله‌ای (۳) محدوده تغییرات رتبه (۱ تا ۱۰) به‌دست می‌آید.

$$R = 0.5C^2 + 4.5C + 5 \qquad (۳)$$

در این رابطه C مقدار شاخص آلودگی برای هر سلول و R رتبه مربوط به آن است. در شکل (٤) پهنه‌بندی کیفی ١٤ پارامتر مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است.

Table 3. Statistical analysis of groundwater quality parameters of the Sarkhon Aquifer

S.T \ Quality parameters	Na	Mg	Ca	So_4	Cl	Hco_3	pH	TDS	TH
Unit			ppm				--	ppm	
Mean	16.8	6.5	7.4	5.7	21.9	2.8	7.8	1915.7	684.9
Max	70	27	26	15	95	4	8	6906	2487
Min	1.83	1.26	1.28	2.06	1.8	2.1	7.39	442	127
SD	21.6	7.3	7.6	3.3	32.1	0.5	0.3	2126.8	722.4
WHO standard	200	300	300	250	200	250	7.5*	600	500

*** Acidity does not have a specific standard and has a range for proper quality. But in this study in order to evaluate the need for a 7.5 fixed value.**

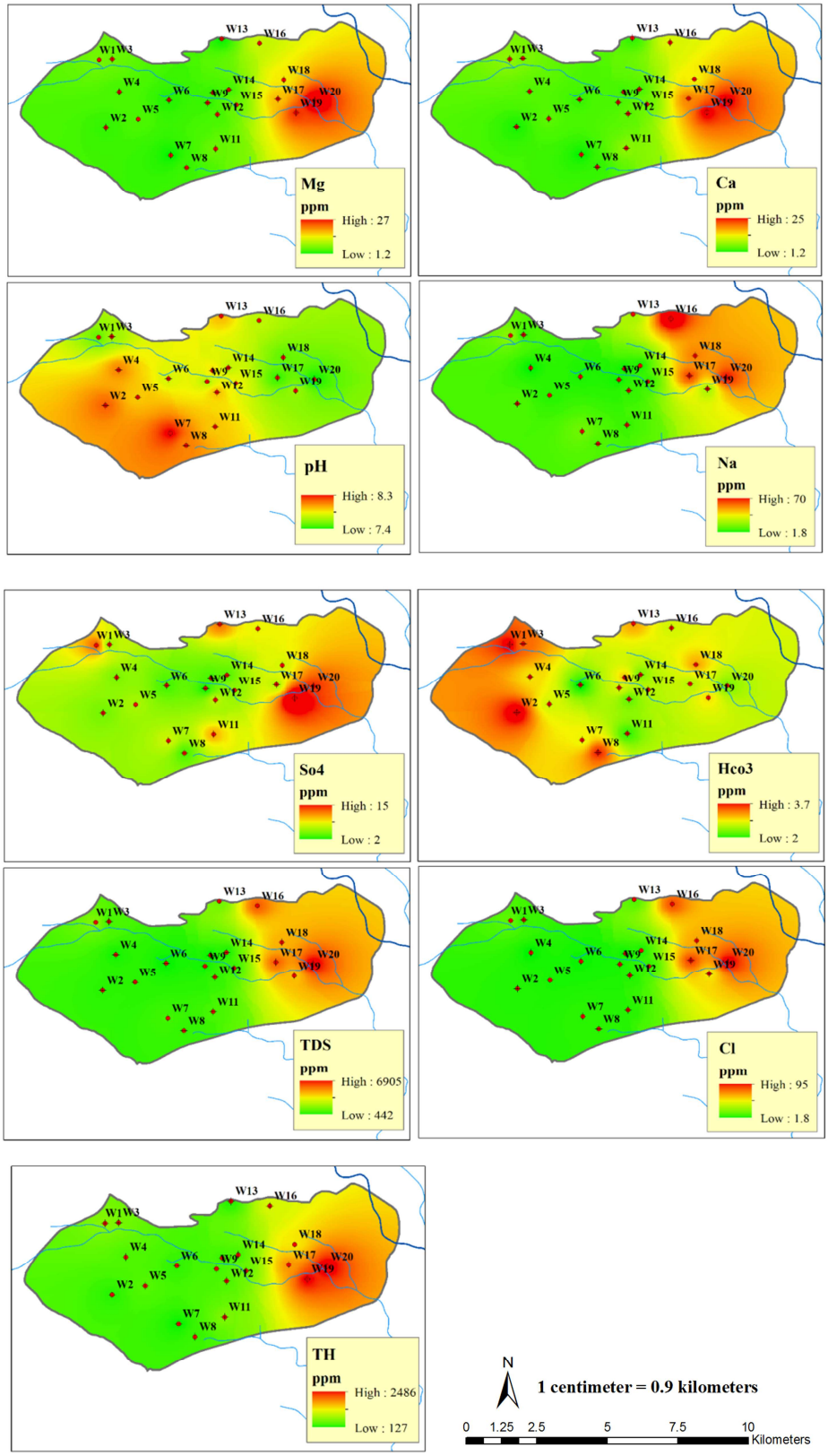

Figure 4. Zoning of qualitative parameters in Sarkhon aquifer

نتایج و بحث

محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ذاتی

جهت برآورد شاخص آسیب‌پذیری نیز از روش ضرب وزن هر لایه در رتبه لایه و در نهایت جمع کل آن‌ها مطابق رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$Vul - Index = \sum_{i=1}^{n} W_i I_i \qquad (٤)$$

در این رابطه، Wi وزن هر پارامتر و Ii رتبه هر پارامتر است. بر این اساس شاخص آسیب‌پذیری آبخوان سرخون مطابق شکل (۵) محاسبه می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده در جدول (٤) نشان می‌دهد که بخش اعظم آبخوان سرخون در وضعیت آسیب‌پذیری متوسط قرار داشته و تنها بخش جنوب‌غربی آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری زیاد است. بررسی تحلیل نقشه‌های مکانی شاخص دراستیک در این موضوع نشان می‌دهد که محیط آبخوان در بالابودن میزان آسیب‌پذیری این بخش نقش مهمی را دارد. هم‌چنین ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری حاکی از این موضوع است که همخوانی مناسبی بین آسیب‌پذیری و آلودگی نیترات وجود ندارد، لذا استفاده از یک شاخص کیفی که ترکیبی از پارامترهای مختلف کیفی در آبخوان است می‌تواند بیانگر وضعیت آسیب‌پذیری ویژه باشد که با تلفیق با آسیب‌پذیری ذاتی نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد.

Table 4. Zoning of the vulnerability index in the Sarkhon aquifer

Classification Vulnerability	Class	Area (km^2)	%
Low vulnerability	76-92	10	13
Medium vulnerability	93-136	53.1	70
High vulnerability	137-159	12.8	17

محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ویژه آبخوان

به‌منظور محاسبه شاخص GQI به عنوان آسیب‌پذیری ویژه آبخوان، سه مرحله محاسبه وزن و رتبه‌های شاخص برای ۱۰ پارامتر کیفی انجام گرفت. بر این اساس وزن هر یک از پارامترها به‌صورت جدول (۵) محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین وزن متعلق به پارامتر کیفی TDS و کم‌ترین وزن مربوط به پارامتر کیفی بی‌کربنات است.

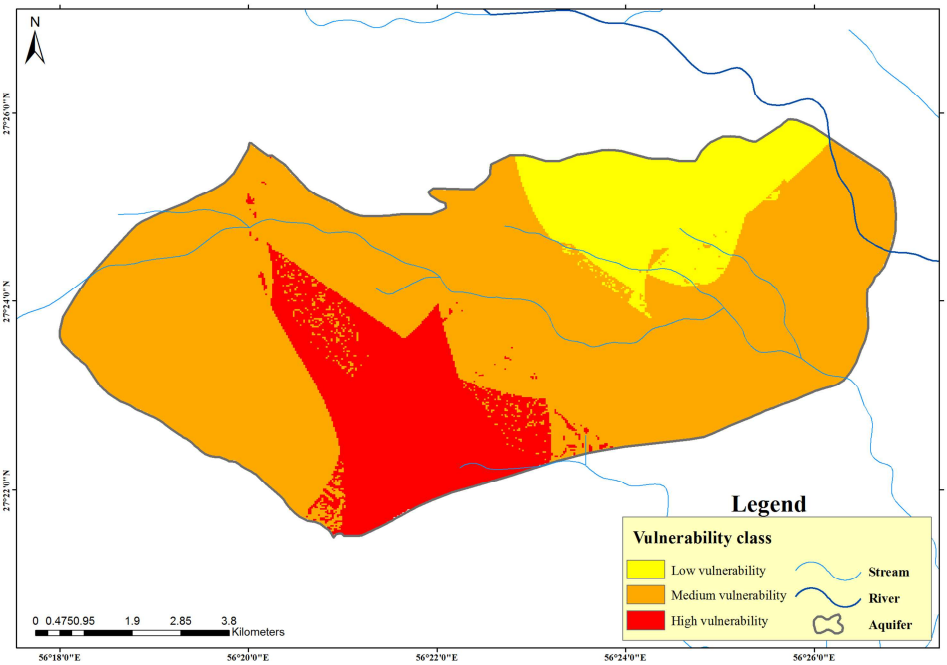

Figure 5. Index of inherent vulnerability of Sarkhon aquifer by drastic index

پس از محاسبه وزن هر یک از پارامترهای شاخص GQI، با ضرب مقدار وزن در رتبه به‌دست‌آمده به‌صورت نقشه رستری که از رابطه (۲) و (۳) به‌دست‌آمده مقدار شاخص به‌دست می‌آید. شکل (٦) شاخص آسیب‌پذیری ویژه آبخوان (GQI) ارائه شده است. براین اساس هرچه میزان شاخص GQI افزایش داشته باشد میزان آسیب‌پذیری یا کیفیت آب مطلوب‌تر است.

تحلیل نتایج کیفی و شاخص GQI حاکی از این موضوع است که بخش شرقی و مرکزی آبخوان که دارای تراکم بالاتر چاه‌های بهره‌برداری است میزان کیفیت آب نامناسب‌تری را داشته و بر این اساس مقدار عددی شاخص کم‌تر بوده و این موضوع بیانگر وضعیت نامناسب‌تر کیفیت است.

محاسبه شاخص آسیب‌پذیری کل

پس از محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه آبخوان، به‌منظور تلفیق دو لایه و به‌دست‌آوردن آسیب‌پذیری کل از رویکرد نرمال‌سازی لایه‌های رستری و ضرب دو لایه استفاده شد. براین اساس هر دو لایه آسیب‌پذیری با استفاده از نرمال‌سازی به مقادیر بین صفر تا یک تبدیل و با ضرب دو لایه مقدار شاخص آسیب‌پذیری کل که تلفیق دو نوع آسیب‌پذیری است به‌صورت شکل (۷) محاسبه شده است.

نتایج به‌دست‌آمده در جدول (٦) از تلفیق دو شاخص آسیب‌پذیری ویژه و ذاتی آبخوان حاکی از بالابودن میزان آسیب‌پذیری در بخش شرقی آبخوان و کم بودن شاخص در بخش ورودی یا غربی آبخوان است. بررسی موضوعی مکانی دو شاخص حاکی از تأثیر مهم پارامترهای کیفی در تعیین منطقه هدف است. به‌طورکلی، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از اهمیت بحث پارامترهای کیفی یا آلودگی در منابع آب زیرزمینی را روشن می‌سازد، به‌گونه‌ای که آلودگی تأثیر زیادی بر پهنه‌های حساس در یک آبخوان دارد.

Table 5. Weight of GQI index parameters

Quality parameters	Na	Mg	Ca	So_4	Cl	Hco_3	pH	TDS	TH	No_3
Weight	3.2	2.8	3.1	3.3	3.4	2.6	3	6.6	4.8	4.4

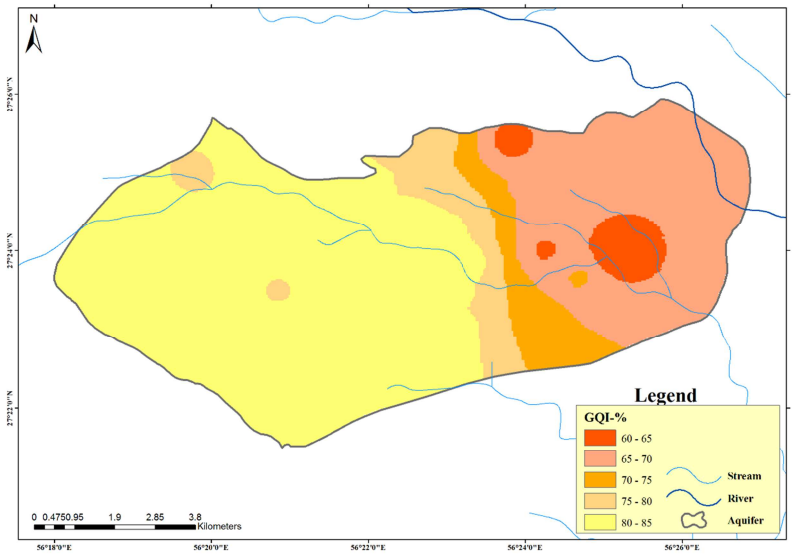

Figure 6. Aquifer specific vulnerability index

Table 6. Zoning of the total vulnerability index in the Sarkhon aquifer

Classification Vulnerability	Area (km^2)	%
Low vulnerability	39.6	52
Medium vulnerability	25.2	33
High vulnerability	11	15

صحت‌سنجی آسیب‌پذیری کل

پس از ترکیب دو شاخص آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه آبخوان و برآورد آسیب‌پذیری کل در آبخوان، صحت‌سنجی این شاخص براساس پارامتر کیفی نیترات مورد ارزیابی قرار گرفت. براین اساس با رویکرد استفاده رویکرد آماری همبستگی، صحت‌سنجی میزان آسیب‌پذیری کل آبخوان ارزیابی شد. پهنه‌بندی غلظت نیترات در سطح آبخوان سرخون مطابق شکل (۸) ارائه شده است.

همبستگی آماری بین شاخص آسیب‌پذیری کل و نیترات حاکی از وجود همبستگی ۷۲ درصد است که در مقایسه با همبستگی با آسیب‌پذیری ذاتی که مقدار ٤٦ درصد است بهبود نسبی زیادی را داشته است.

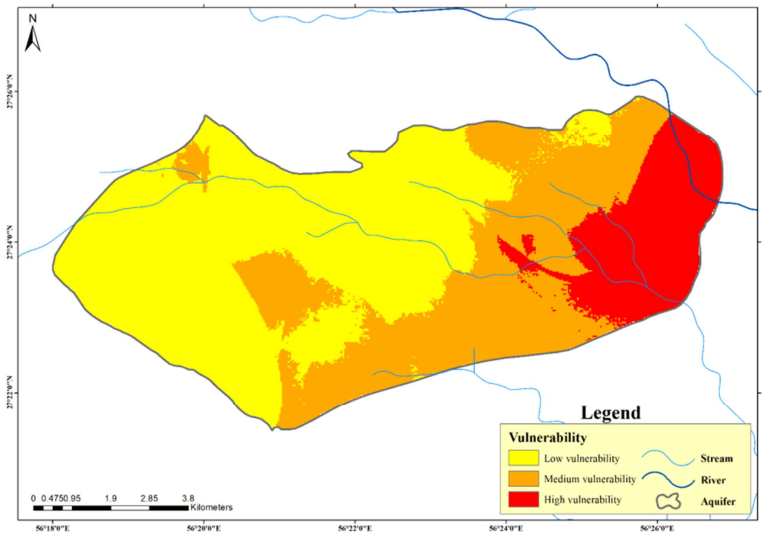

Figure 7. Total vulnerability in Sarkhoon aquifer

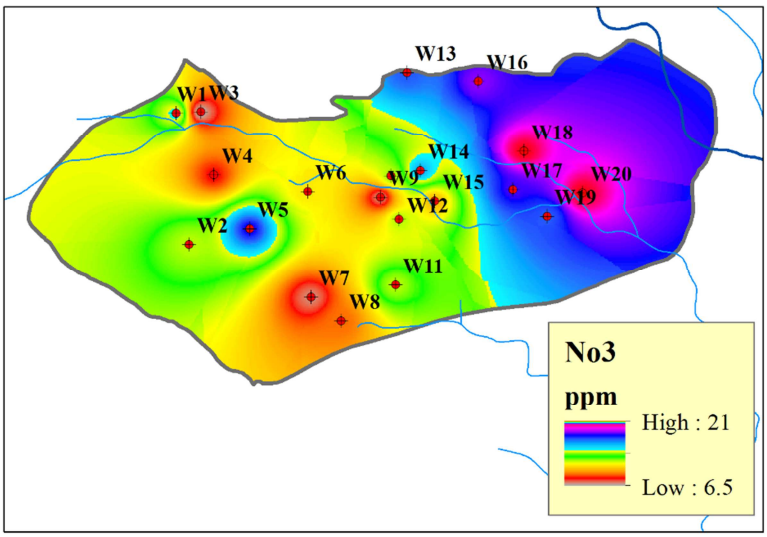

Figure 8. Zoning of nitrate in Sarkhon aquifer

نتیجه‌گیری

یکی از ابزارهای مهم در تصمیم‌گیری در جهت توسعه مناطق مختلف استفاده از مفهوم آسیب‌پذیری است. این مفهوم در این جهت به‌منظور تعیین پتانسیل‌های مستعد برای توسعه با تلفیق خصوصیات ذاتی آبخوان و وضعیت آلودگی می‌تواند بسیار مناسب باشد. در این مطالعه به‌منظور توسعه آبخوان سرخون در جنوب کشور، از این مفهوم استفاده شد. بر این اساس با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری دراستیک میزان آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان و با استفاده از شاخص GQI، میزان آسیب‌پذیری ویژه آبخوان محاسبه شد. تلفیق هفت پارامتر شاخص دراستیک نشان داد که بیش‌تر سطح آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری متوسط قرار داشته و تنها بخشی از مناطق ابتدایی آبخوان در بخش جنوبی در کلاس آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. نتایج شاخص آسیب‌پذیری ویژه آبخوان نیز نشان که پارامتر کیفی TDS دارای بیش‌ترین وزن و پارامتر کیفی بی‌کربنات دارای کم‌ترین وزن در محاسبه شاخص است. تحلیل پهنه‌بندی کیفی شاخص GQI نشان داد که بخش‌های مرکزی آبخوان که دارای ضخامت بیش‌تر است و تراکم چاه‌های بهره‌برداری بالاتر بوده و میزان آلودگی و شاخص نیز بیش‌تر است. تلفیق این دو شاخص جهت محاسبه آسیب‌پذیری آبخوان با نرمال‌سازی لایه‌های نهایی دو شاخص ارزیابی شد و نتایج نشان داد که بخش شرقی آبخوان دارای بیش‌ترین میزان آسیب‌پذیری بوده و بخش‌های غربی و ابتدایی آبخوان دارای کم‌ترین میزان آسیب‌پذیری و بیش‌ترین پتانسیل توسعه است. در نهایت به‌منظور صحت‌سنجی شاخص آسیب‌پذیری کل، همبستگی آماری با غلظت نیترات برقرار شد که نتایج حاکی از همبستگی ۰/۷۲ در آبخوان است. نتایج این مطالعه با توجه به تلفیق دو شاخص آسیب‌پذیری ویژه و ذاتی می‌تواند در شناخت بهتر مناطق قابل توسعه و پتانسیل‌های بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی یک منطقه مؤثر باشد. نتایج این مطالعه با در نظرگرفتن پارامترهای کیفی آبخوان حاکی از دقت مناسب روش GQI جهت تحلیل کیفی و شناخت حساسیت‌های آلودگی در آبخوان است که می‌تواند جایگزین غلظت نیترات باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. 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.
2. Arya, S., Subramani, T., Vennila, G., & Roy, P.D. (2020). Groundwater vulnerability to pollution in the semi-arid Vattamalaikarai River Basin of south India thorough DRASTIC index evaluation. *Geochemistry*, 80(4),125635.
3. Babiker, I.S., Mohamed, M.A., & Hiyama, T. (2007). Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21(4), 699-715.
4. 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.
5. Javadi, S., Hashemi, M., & Sokhtezari, M. (2018). Analysis of multiple parameters pollution map based on land use map and using K-mean clustering technique in Qazvin aquifer. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(1), 293-305. [In Persian].
6. Javadi, S., & Kardan moghaddam, H. (2019). Utilizing 3-D Simulation of saltwater intrusion in desert aquifer by SEAWAT model. *Water and Irrigation Management*, 9(1), 129-142. [In Persian].
7. Javadi, S., Kavehkar, N., Mousavizadeh, M.H., & Mohammadi, K. (2011). Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas.
8. Javadi, S., Hashemy, S.M., Mohammadi, K., Howard, K.W.F., & Neshat, A. (2017). Classification of aquifer vulnerability using K-means cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 549, 27-37.

9. Javadi, S., Kardan Moghaddam, H., & Neshat, A. (2018). Evaluation and Simulation of Groundwater Flow in Aquifers Enclosed with Desert Saline Areas (Case Study: Isfahan Province-Ardestan Aquifer), *Water Harvesting Research*, 3(1), 1-14.
10. Kardan moghaddam, H., Javadi, S., & Rahimzadeh, Z. (2020). Evaluation of Aquifer Vulnerability Assessment Methods for Alluvial and Coastal Aquifers, Case Study in Astaneh-Koochesfahan Aquifer, Guilan, Iran. *Journal of water and irrigation management*, 10(2), 203-220 [In Persian].
11. 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.
12. Kardan moghaddam, H., & Roozbahani, A. (2016). Evaluation of Bayesian networks model in monthly groundwater level prediction (Case study: Birjand aquifer). *Journal of water and irrigation management*. 5(2): 139-151[In Persian].
13. Ministry of Power. (2015). Report of Reduction program and balance groundwater in sarkhoon aquifer. (In Persian)
14. Moghaddam, H.K., Kivi, Z.R., Bahreinimotlagh, M., & Moghddam, H.K. (2020). Evaluation of the groundwater resources vulnerability index using nitrate concentration prediction approach. *Geocarto International* (just-accepted), 1-15.
15. Saadati, H., Malekian, A., & Moghaddamnia, A. (2020). Assessment of Vulnerability Index and Risk Zoning in Ardabil Plain. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 157-171. [In Persian].
16. Singha, S., Devatha, C.P., Singha, S., & Verma, M.K. (2015). Assessing ground water quality using GIS. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(11), 11.
17. Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., & Yousefi, H. (2021). DRASTIC framework improvement using stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) and combination of genetic algorithm and entropy. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(34), 46704-46724.
18. Wang, B., Teng, Y., Wang, H., Zuo, R., Zhai, Y., Yue, W., & Yang, J. (2020). Entropy weight method coupled with an improved DRASTIC model to evaluate the special vulnerability of groundwater in Songnen Plain, Northeastern China. *Hydrology Research*, 51(5), 1184-1200.