



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۹ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۸

صفحه‌های ۲۵۱-۲۶۲

ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی با استفاده از روش ترکیبی

عطاالله ندیری^{۱*}، الهام اکبری^۲، اسفندیار عباس نوین‌پور^۳، مریم قره‌خانی^۴

۱. دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز.

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۳. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

۴. دانشجوی دکتری آب‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۹

چکیده

توسعه کشاورزی و صنعت علاوه بر افزایش مصرف آب موجب کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی نیز شده است. در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان دشت خوی از روش‌های DRASTIC، SINTACS و ترکیب این دو روش استفاده شده است. روش‌های DRASTIC و SINTACS پارامترهای هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی منطقه برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان و پهنه‌بندی مناطق مستعد آلودگی استفاده می‌کنند ولی هر کدام از این روش‌ها خصوصیات ذاتی خود را داشته و نتایج متفاوتی را ارائه می‌کنند. در این پژوهش، بررسی عملکرد هر کدام از روش‌های DRASTIC و SINTACS بر اساس معیارهای ارزیابی متفاوت، نتایج متفاوتی را نیز ارائه داد که بر اساس آن امکان انتخاب یکی از این روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی میسر نبود لذا از ترکیب این دو روش استفاده گردید تا بتوان بر اساس یک نقشه واحد در مورد آسیب‌پذیری آبخوان اظهار نظر کرد. صحت‌سنجی هر کدام از این روش‌ها و مقایسه نتایج آن‌ها با استفاده از مقادیر نترات اندازه‌گیری شده از ۲۶ حلقه چاه در محدوده مطالعاتی و محاسبه شاخص همبستگی (CI) و ضریب همبستگی (r) بین نقشه‌های آسیب‌پذیری و مقادیر نترات انجام گرفته است. نتایج نشان داد که روش ترکیبی، شاخص همبستگی و ضریب همبستگی بیش‌تری نسبت به روش‌های DRASTIC و SINTACS دارد و از این‌رو برای ارزیابی آسیب‌پذیری این منطقه مناسب‌تر است. در نقشه آسیب‌پذیری حاصل از روش ترکیبی ۱۹، ۴۲ و ۳۹ درصد از مساحت آبخوان دشت خوی به‌ترتیب در محدوده آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار دارند و قسمت‌های مرکزی و غربی دشت دارای آسیب‌پذیری بالا می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، روش ترکیبی، DRASTIC، SINTACS.

Assessment of Khoy Aquifer Vulnerability Using a Combined Method

Ata Allah Nadiri^{1*}, Elham Akbari², Esfandiari Abbas Novinpour³, Maryam Gharekhani⁴

1. Associate Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Former M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Geology, Science Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.

4. Ph.D. Candidate, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: October 21, 2019

Accepted: December, 07, 2019

Abstract

Agricultural and industrial development has led to a sharp increase in water use, a decrease in the quantity, quality and pollution of groundwater resources. Appropriate measures to prevent pollution of groundwater resources are the identification of vulnerable aquifers. In this study, combined method is the combination of DRASTIC and SINTACS methods, was used to evaluate the vulnerability of Khoy plain aquifer. Both methods use hydrological and hydrogeological parameters of this area to investigate the aquifer vulnerability and zoning of susceptible areas, but each of these methods has inherent characteristics and presents different results. Therefore, in this study due to the similarity of the results of these two. The method has been used simultaneously using combination of their advantages. Validation of each of methods were carried out with measured nitrate values from 26 wells in the study area. The Correlation Index (CI) and correlation coefficient (r) were calculated between vulnerability maps and nitrate values to validation and compare these methods. The results showed that the CI and r of combined method is high; therefore, this method is more suitable for assessing the vulnerability of this region. Based on the results of the combined method, 19, 42 and 39 percent of Khoy plain aquifer are located within low, medium and high vulnerable areas.

Keywords: Combined Method, DRASTIC, Groundwater vulnerability, SINTACS.

مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آبی هر کشوری است که متأسفانه بی‌توجهی به آن موجب توزیع و انتقال آلاینده‌های مختلف به این منابع شده است. برای پاکسازی آب‌های زیرزمینی آلوده و مصرف مجدد آن، اغلب باید وقت و هزینه زیادی صرف شود و یافتن منابع آبی جایگزین همیشه امکان‌پذیر نیست (۱، ۲ و ۴). بنابراین بهترین و مؤثرترین روش، جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به این منابع است. یکی از راه‌کارهای جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی، شناسایی مناطق دارای پتانسیل آلودگی بالا یا به عبارتی تعیین مناطق آسیب‌پذیر می‌باشد. آسیب‌پذیری به‌عنوان یک ویژگی ذاتی آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود که پتانسیل آبخوان را برای نفوذ و گسترش و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد (۱۱). آسیب‌پذیری یک ویژگی بدون بعد، نسبی و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (۱۰). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به روش‌های مختلفی (۲۳) از جمله روش‌های رتبه‌دهی توصیفی، آماری-تحلیلی و ترکیبی انجام می‌گیرد (۸). از مهم‌ترین روش‌های رتبه‌دهی می‌توان به روش‌های SI (۲۰ و ۲۱)، SINTACS (۱۳)، DRASTIC (۹)، AVI (۲۲) و GOD (۱۵ و ۱۲) اشاره کرد. این روش‌ها بر پایه تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلفی بنا نهاده شده‌اند و اساس کار یکسانی دارند. همچنین بر ارزیابی توصیفی و کمی آسیب‌پذیری تکیه دارند این روش‌ها در به‌کارگیری نوع، تعداد، رتبه‌دهی و وزن‌دهی پارامترها با هم تفاوت داشته ولی در نهایت با برهم‌نهی لایه‌های پارامترها، شاخص عددی برای آسیب‌پذیری به‌دست می‌آید. از میان این روش‌ها، روش DRASTIC پرکاربردترین روش رتبه‌دهی و هم‌پوشانی است که توسط

انجمن ملی آب زیرزمینی با همکاری آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده ایجاد شده است (۹). چارچوب عملی DRASTIC به‌دلیل در نظر گرفتن تعداد پارامتر بیشتر و دقت بالاتر در مطالعات فراوانی در آبخوان‌های کشورهای مختلف جهان برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با موفقیت استفاده شده است (۷ و ۱۸). به‌دنبال توسعه روش‌های رتبه‌دهی مطالعات فراوانی برای مقایسه توانایی آنها در آبخوان‌های مختلف انجام شده است. به‌طوری‌که هر یک از آنها به مقایسه دو یا چند روش آسیب‌پذیری پرداخته‌اند و با وجود این‌که توانایی هر کدام از روش‌ها به اثبات رسیده است ولی در تمام مطالعات برتری نسبی روش‌های DRASTIC و SINTACS مورد تأیید بوده است (۷، ۱۹، ۶ و ۱۶). علاوه بر وجود تفاوت‌های ذاتی بین دو روش DRASTIC و SINTACS که از آن جمله می‌توان به محدوده وسیع‌تر کلاسه‌بندی آسیب‌پذیری روش DRASTIC نسبت به روش SINTACS اشاره کرد و روش SINTACS برای بهره‌وری اراضی مناسب‌تر است، نتایج تحقیقات عموماً مشابه هم بوده و یا تفاوت‌های منطقه‌ای با هم دارند (۱۴). لذا انتخاب هر یک از این روش‌ها به‌عنوان یک روش برتر باعث افزایش عدم قطعیت در نتایج خواهد شد.

دشت خوی از مناطق فعال کشاورزی، دامداری و صنعت است که در آن از کودهای کشاورزی استفاده می‌شود این مواد به‌همراه پساب‌ها و فاضلاب‌های محل می‌تواند آب‌های زیرزمینی منطقه را آلوده کند. بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان این دشت به‌منظور تعیین مناطق با پتانسیل بالای آلودگی آب زیرزمینی ضرورت دارد. در پژوهش‌های قبلی بیش‌تر از یک یا چند روش منفرد برای تخمین آسیب‌پذیری آبخوان‌ها استفاده شده است. اصلی‌ترین تفاوت دو روش DRASTIC و SINTACS در بازه رتبه‌دهی و وزن‌های اختصاص‌یافته به

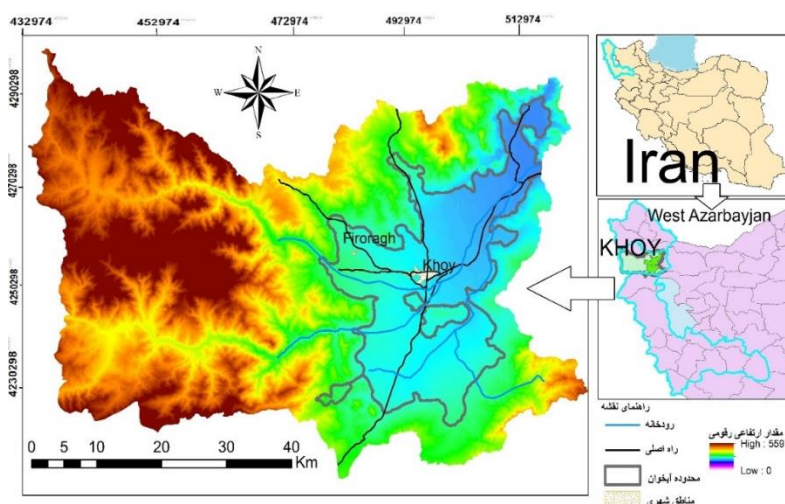
سفره‌های آب زیرزمینی و آب برگشتی به وجود آمده که به قطورچای ملحق می‌شود. از نظر هواشناسی، متوسط دمای سالانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه رازی ۱۱/۷ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی در کل حوضه ۳۱۸ میلی‌متر می‌باشد. بر اساس مطالعات هیدروژئولوژیکی، در دشت خوی دو نوع آبخوان آزاد و تحت فشار وجود دارد، اما به علت افت شدید سطح آب زیرزمینی در حال حاضر آبخوان تحت فشار به آزاد تبدیل شده و بنابراین برای این منطقه فقط یک نوع آبخوان آزاد در نظر گرفته می‌شود و هم‌چنین جنس سنگ کف آبخوان از نوع مارن و کنگلومرا است. منابع آب زیرزمینی از طریق ۱۳۵۵ حلقه چاه، ۲۰ رشته قنات و ۲۰ دهنه چشمه که در منطقه مطالعاتی وجود دارد تخلیه می‌گردد. پایش ماهانه سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از ۷۱ چاه مشاهده‌ای موجود در منطقه انجام می‌گیرد. حداقل عمق آب زیرزمینی در حاشیه رودخانه‌های آند و قطور ۱ متر و حداکثر آن در نواحی غربی (فیوروق) ۹۲ متر می‌باشد. جهت جریان آب زیرزمینی از غرب و جنوب‌غربی به سمت شمال‌شرقی است و مقدار متوسط ضریب ذخیره در دشت خوی ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.

هر پارامتر است. در این پژوهش علاوه بر استفاده از هر دو چارچوب عملی DRASTIC و SINTACS روشی برای ترکیب در محیط GIS و استفاده همزمان از کارایی هر دو چارچوب عملی برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی ارائه شده است (۳). هدف از ترکیب این دو روش استفاده همزمان از مزایای هر دو روش و ارائه یک نقشه واحد به منظور پهنه‌بندی بهتر مناطق دارای پتانسیل آلودگی و مدیریت منابع آب این منطقه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه آبخوان دشت خوی می‌باشد که در شمال استان آذربایجان غربی قرار دارد، از جنوب به محدوده سلماس و از غرب به مرز کشور ایران و ترکیه محدود می‌شود (شکل ۱). منابع آب سطحی منطقه عمدتاً شامل دو رودخانه قطور و آند می‌باشد که این دو رودخانه از ارتفاعات غربی دشت سرچشمه گرفته و پس از طی مسیر و عبور از نواحی سنگی وارد دشت شده و غالباً به مصرف کشاورزی می‌رسند. هم‌چنین رودخانه قره‌سو در جنوب‌شرقی دشت عمدتاً در اثر زهکشی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقشه ارتفاعی رقومی (DEM) حوضه آبریز خوی

چارچوب عملی DRASTIC

چارچوب عملی DRASTIC یک روش کمی است که برای برآورد پتانسیل آلودگی سیستم آب زیرزمینی در یک مقیاس ناحیه‌ای طراحی شده است. در شاخص DRASTIC چهار فرض در نظر گرفته می‌شود: (۱) آلودگی از سطح زمین وارد آب می‌شود، (۲) آلودگی از طریق بارندگی شسته‌شده و وارد آب زیرزمینی می‌شود، (۳) آلودگی از طریق آب و با سرعت مشابه به آن وارد آبخوان می‌شود و (۴) منطقه مورد مطالعه این روش باید ۴ هکتار یا بزرگ‌تر از آن باشد. براساس آن پارامترهای مختلف هیدروژئولوژیکی تأثیرگذار در انتقال آلودگی با یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش با یکدیگر جمع شده و در نهایت نقشه آسیب‌پذیری را ارائه می‌دهند (۹). این روش براساس هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی است که شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، ناحیه غیراشباع (I) و ضریب هیدرولیکی (C) می‌باشد. در روش DRASTIC به هر پارامتر یک رتبه (از یک تا ۱۰) و یک وزن (از یک تا پنج) بر حسب اهمیت پارامتر اختصاص داده می‌شود به طوری که یک به معنای کم‌ترین و ۱۰ بیش‌ترین خطر برای آلودگی است (۱۹). از این‌رو شاخص DRASTIC براساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود (۹).

$$DI = \quad (1)$$

$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$
در رابطه بالا، DI شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC. حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای هفت‌گانه، r رتبه و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود.

چارچوب عملی SINTACS

به‌دنبال چارچوب عملی DRASTIC، چارچوب عملی

SINTACS نیز به‌منظور بررسی آسیب‌پذیری ارائه شده است. این روش اولین بار توسط سیویتا و همکاران در سال ۱۹۹۰ برای بررسی آسیب‌پذیری جنوب ایتالیا به‌کار برده شد و در آن هفت پارامتر عمق سطح ایستابی (S)، تغذیه خالص (I)، اثر منطقه غیراشباع (N)، نوع خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C) و شیب (S) برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان به‌کار رفته است. روش SINTACS از روش DRASTIC مشتق شده است. در حقیقت پارامترهای این روش همان پارامترهای روش DRASTIC است ولی با این تفاوت که فرآیند وزن رتبه‌دهی پارامترها در روش SINTACS انعطاف بیش‌تری دارد (۱۳). در این روش نیز بعد از رتبه‌دهی و وزن‌دهی، در نهایت شاخص آسیب‌پذیری با رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در رابطه زیر، P_i رتبه هر پارامتر و W_i وزن نسبی پارامترها است.

$$\sum_i^7 I_{SINTACS} = P_i \times W_i \quad (2)$$

روش ترکیبی

تفاوت دو روش DRASTIC و SINTACS مربوط به گستردگی رتبه و تفاوت وزن برخی از پارامترها در روش SINTACS است، که شاخص آسیب‌پذیری متفاوتی نسبت به روش DRASTIC ارائه می‌دهد. علاوه بر وجود تفاوت‌های ذاتی بین دو روش DRASTIC و SINTACS نتایج تحقیقات عموماً مشابه بوده ولی تفاوت‌های منطقه‌ای با هم دارند به طوری که در برخی مناطق آبخوان هر یک از روش‌ها برتری نسبی را نشان می‌دهند. وجود تفاوت‌های منطقه‌ای باعث تفاوت در نتایج خروجی این دو روش می‌شود. در این پژوهش، از روش جدیدی (روش DSM) به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی استفاده شده است. در روش DSM (DRASTIC and SINTACS Methods) به‌کار برده شده،

$$VI_{total} = \frac{CI_{DRASTIC} \times DRASTIC + CI_{SINTACS} \times SINTACS}{\sum CI_i} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، عبارتهای DRASTIC و SINTACS توزیع مکانی شاخص آسیب‌پذیری هر یک از روش‌ها را به صورت نرمال شده نشان می‌دهد. نرمال سازی نتایج توزیع مکانی شاخص آسیب‌پذیری هر یک از روش‌ها توسط رابطه (۴) انجام شده است. در ادامه به چگونگی محاسبه هر یک از روش‌ها پرداخته خواهد شد. هم‌چنین VI_{total} و CI_i به ترتیب بیانگر شاخص همبستگی مربوط به هر یک از روش‌ها و شاخص آسیب‌پذیری به دست آمده از ترکیب روش‌ها است.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

در رابطه بالا X بیانگر شاخص آسیب‌پذیری و X_{norm} شاخص آسیب‌پذیری نرمال شده هر کدام از روش‌ها را نشان می‌دهد. هم‌چنین X_{min} و X_{max} به ترتیب بیانگر حد بالا و پایین شاخص آسیب‌پذیری مربوط به هر یک از روش‌هاست.

با ترکیب هر دو روش DRASTIC و SINTACS که در این تحقیق به کار رفته از مزایای هر دو روش به طور همزمان استفاده می‌شود. در روش ترکیبی، وزن هر یک از روش‌ها توسط شاخص همبستگی (CI) که از همبستگی بین مقادیر نیترا و شاخص آسیب‌پذیری به دست می‌آید تعیین می‌شود (نحوه محاسبه شاخص همبستگی در بخش نتایج توضیح داده شده است). شایان ذکر است که برای چنین ترکیبی باید توزیع مکانی شاخص آسیب‌پذیری هر دو روش در بازه یکسانی تغییر کند. به این منظور نتایج آسیب‌پذیری بین بازه صفر و یک نرمال سازی شده است. از آنجایی که در روش ترکیبی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و SINTACS برای منطقه نرمال می‌شوند، لذا نمی‌توان آسیب‌پذیری این منطقه را با مناطق دیگر توسط این روش مقایسه کرد که از محدودیت‌های این روش به شمار می‌رود. رابطه (۳) چگونگی ترکیب نتایج روش‌های DRASTIC و SINTACS را نشان می‌دهد:

جدول ۱. پارامترها و وزن‌های روش DRASTIC و SINTACS

وزن نسبی		توصیف پارامترها	پارامترهای DRASTIC و
SINTACS	DRASTIC		SINTACS
۵	۵	عمق آب زیرزمینی فاصله از سطح زمین تا سطح ایستایی است و هر چقدر این عمق کم تر باشد شانس انتقال آلاینده‌ها به آبخوان بیش تر است.	S و D
۴	۴	منظور از تغذیه مقدار آبی است که از سطح زمین به داخل آبخوان نفوذ می‌کند. بنابراین با افزایش میزان تغذیه احتمال انتقال آلاینده‌ها به آبخوان افزایش می‌یابد.	I و R
۳	۳	خصوصیات مواد تشکیل دهنده منطقه اشباع در میزان پویایی و تحرک آلودگی و به عبارتی فرایندهای رقیق سازی آلودگی مانند تجزیه شیمیایی، جذب و پخش نقش دارند.	A
۴	۲	محیط خاک در چگونگی تغذیه و چگونگی حرکت آلاینده‌ها نقش دارد. وجود مواد با بافت ریزدانه تراوایی خاک را کاهش می‌دهد و برعکس مواد دانه درشت تر نفوذپذیری خاک را افزایش می‌دهد.	T و S
۲	۱	این پارامتر به شیب منطقه اشاره دارد. هرچقدر شیب زمین کم تر باشد میزان نفوذ بیش تر است و بالعکس.	S و T
۵	۵	منطقه غیر اشباع رسوبات بالای سطح ایستایی را شامل می‌شود و عبور و رقیق شدن مواد آلاینده را به منطقه اشباع کنترل می‌کند.	N و I
۳	۳	هدایت هیدرولیکی حرکت آلاینده و پخش آن را در منطقه اشباع کنترل می‌کند. پس هر چه هدایت هیدرولیکی بیش تر باشد امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیش تر خواهد بود.	C

وارد و سپس در نرم‌افزار ARC GIS به روش Kriging درون‌یابی انجام گرفت و به فرمت رستری تبدیل گردید. در نهایت بعد از رتبه‌دهی بر اساس رتبه‌بندی آلر و همکاران و (۹) و سیویتا (۱۳)، لایه رتبه‌بندی شده عمق آب زیرزمینی به ترتیب برای روش DRASTIC و SINTACS تهیه گردید (شکل‌های ۲ و ۳).

تغذیه آب زیرزمینی (R و I)

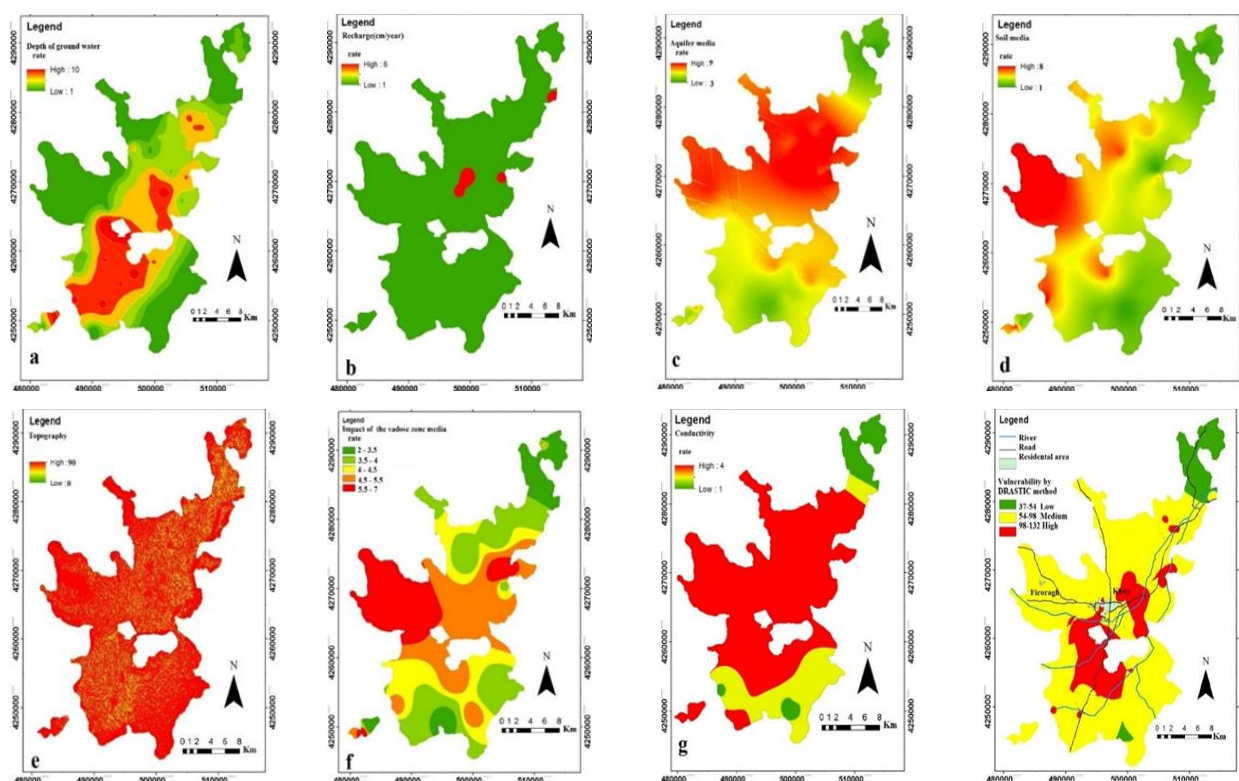
تغذیه مقدار آب نفوذی ناشی از نزولات جوی است که باعث شسته‌شدن آلاینده‌ها از سطح زمین و انتقال آن به آبخوان می‌شود. میزان تغذیه به آبخوان با استفاده از بیلان آب زیرزمینی محاسبه گردید و سپس بعد از درون‌یابی و رتبه‌دهی بر اساس رتبه‌بندی مربوط به هر یک از روش‌ها، لایه تغذیه آب زیرزمینی تهیه گردید (شکل‌های ۲ و ۳).

تهیه لایه‌های روش‌های SINTACS و DRASTIC

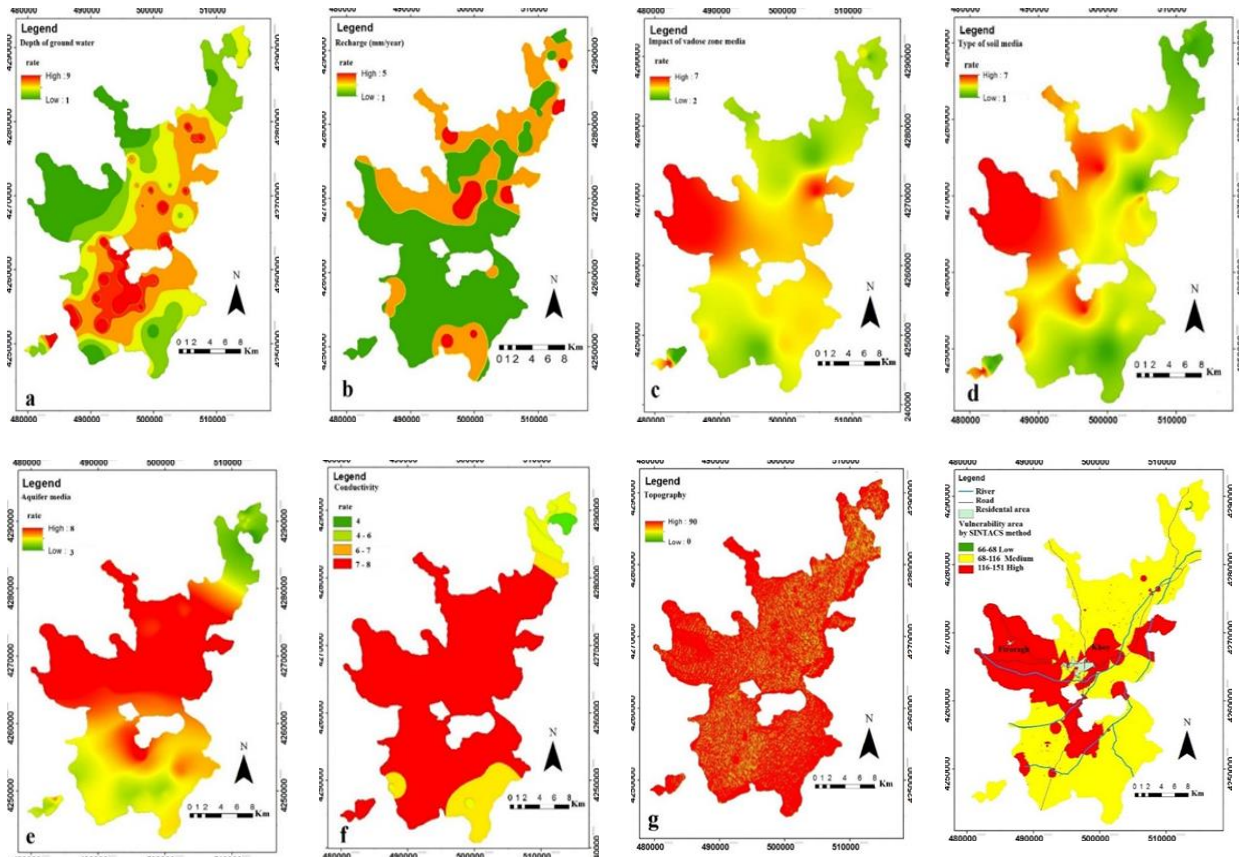
روش تهیه لایه‌های روش‌های SINTACS و DRASTIC شبیه به هم می‌باشد و تنها رتبه‌دهی و وزن‌دهی روش‌ها متفاوت است، که برای وزن‌دهی و رتبه‌دهی روش‌های دراستیک و سینتکس به ترتیب از رتبه‌ها و وزن‌های ارائه‌شده توسط آلر و همکاران (۹) و سیویتا (۱۳) استفاده شده است. توضیحات کلی مربوط به هر کدام از هفت پارمتر در جدول (۱) ارائه شده است و در ادامه نحوه تهیه هر کدام از پارامترها شرح داده شده است.

عمق آب زیرزمینی (D و S)

برای تهیه لایه‌های عمق آب زیرزمینی، ابتدا موقعیت و عمق آب چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه به محیط اکسل



شکل ۲. نقشه‌های پارامترهای روش DRASTIC (a, b, c, d, e, f, g) و نقشه نهایی آسیب‌پذیری دشت خوی به روش DRASTIC



شکل ۳. نقشه‌های پارامترهای روش SINTACS (a, b, c, d, e, f, g) و نقشه نهایی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی به روش SINTACS

استفاده شد و سپس نقشه شیب از لایه ارتفاعی رقومی استخراج شد و در نهایت بعد از رتبه‌دهی با استفاده از رتبه‌بندی مربوط به هر کدام از روش‌ها، لایه توپوگرافی برای روش DRASTIC و SINTACS تهیه گردید (شکل‌های ۲ و ۳).

هدایت هیدرولیکی (C)

به منظور محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان از اطلاعات موجود در منطقه از جمله داده‌های قابلیت انتقال و دانه‌بندی خاک در ضخامت اشباع آبخوان استفاده شد و سپس به روش IDW (به دلیل خطای کم‌تر) درون‌یابی گردید و بعد از رتبه‌دهی، لایه هدایت هیدرولیکی به دست آمد (شکل‌های ۲ و ۳).

محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S و T) و محیط غیراشباع (I و N)

برای تهیه این نقشه‌ها، ابتدا با استفاده از لاگ چاه‌های منطقه، نقشه زمین‌شناسی و گزارش‌های آب منطقه‌ای جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (بخش اشباع یا بخش زیر سطح ایستابی)، محیط خاک (بخش رویی تا عمق ۲ متری) و محیط غیراشباع (بخش بالای سطح ایستابی) مشخص شد و سپس بر اساس جنس رسوبات رتبه‌دهی انجام گرفت (۷) و در نهایت با اعمال درون‌یابی لایه‌های محیط آبخوان، محیط خاک و محیط غیراشباع به دست آمد (شکل‌های ۲ و ۳).

توپوگرافی (T و S)

برای تهیه این لایه از مدل ارتفاعی رقوم منطقه (DEM)

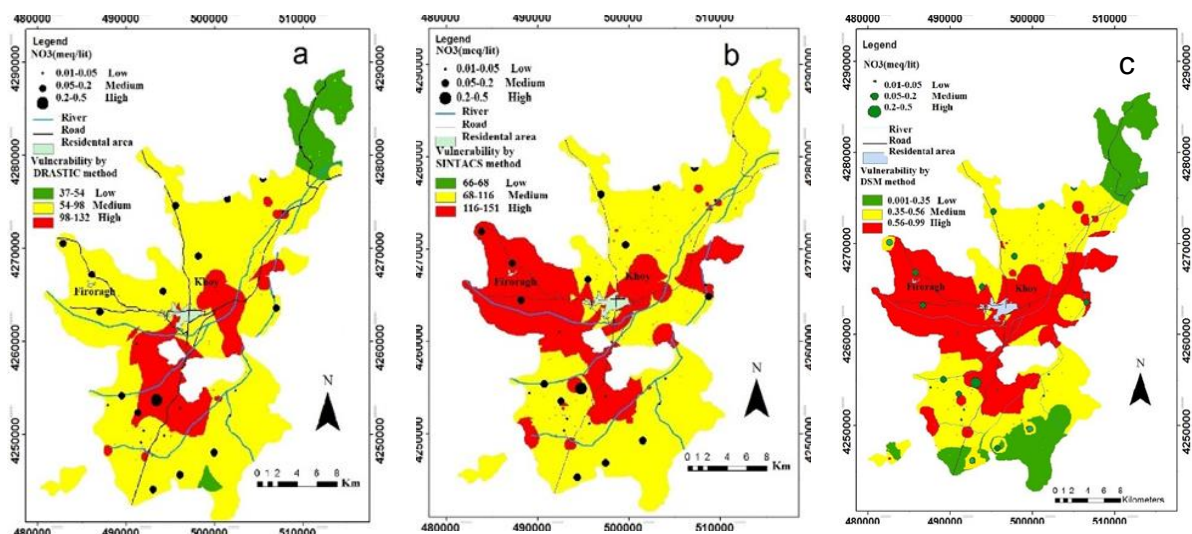
جنوب شرقی دشت را شامل می‌شود و نیز ۳۱ درصد از مساحت دشت در محدوده نسبتاً زیاد است که بیش‌تر قسمت‌های غربی و مرکزی دشت را شامل می‌شود. نقشه آسیب‌پذیری و نقشه‌های مربوط به هر کدام از پارامترهای روش SINTACS در شکل (۳) ارائه شده است.

صحت‌سنجی و مقایسه چارچوب عملی DRASTIC و SINTACS

با توجه به این‌که در منطقه مورد مطالعه، کشاورزی و باغداری از رونق خاصی برخوردار است و کاربری اراضی منطقه معمولاً مزارع پرورش تخمه آفتابگردان و تخم کدو و در بعضی نقاط باغات میوه است و غالباً کودهای حیوانی و شیمیایی نیتراتی زیاد استفاده می‌شود. بنابراین برای صحت‌سنجی روش‌های DRASTIC و SINTACS از مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده از ۲۶ حلقه چاه آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه استفاده گردید (شکل ۴). برای این منظور مقادیر نیترات مانند نقشه پهنه‌بندی به سه قسمت کم، متوسط و زیاد تقسیم شد با انطباق مقادیر یون نیترات بر روی هر کدام از نقشه‌های آسیب‌پذیری مشاهده شد که در شمال و شمال شرقی دشت روش DRASTIC بهتر از روش SINTACS و در قسمت‌های مرکزی و غربی دشت روش SINTACS بهتر از روش DRASTIC برای پهنه‌بندی مناطق مستعد آلودگی جواب می‌دهد. در ادامه برای بررسی دقیق‌تر و مقایسه بهتر روش‌ها، ضریب همبستگی (r) و شاخص همبستگی (CI) بین شاخص آسیب‌پذیری روش‌ها با میزان نیترات محاسبه گردید. ضریب همبستگی بین میزان غلظت نیترات و چارچوب عملی DRASTIC و SINTACS به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۳۱ به دست آمد که بر این اساس روش SINTACS عملکرد بهتری دارد (جدول ۲).

نتایج حاصل از چارچوب عملی DRASTIC و SINTACS

پس از تهیه هفت لایه رستری مورد نیاز برای هر کدام از روش‌ها و وزن‌دهی بر اساس جدول (۱)، از تلفیق این پارامترها طبق روابط (۱) و (۲) شاخص آسیب‌پذیری به روش DRASTIC و SINTACS به دست آمد. شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC برای دشت خوی بین ۳۷ تا ۱۳۲ به دست آمد که با توجه به طبقه‌بندی آلر و همکاران (۹) آسیب‌پذیری دشت خوی در سه گروه آسیب‌پذیری کم (۵۴-۳۴)، متوسط (۹۸-۵۴) و زیاد (۱۳۲-۹۸) قرار می‌گیرد. بیش‌ترین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی منطقه مربوط به آسیب‌پذیری متوسط است که ۷۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را تحت پوشش قرار می‌دهد. این رده بخش‌هایی از شمال غرب و شمال و مراکز دشت و قسمت‌هایی از جنوب دشت را شامل می‌شود. شمال و شمال شرقی دشت در محدوده آسیب‌پذیری کم قرار دارند که ۸ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شود و بخش‌هایی از مرکز، غرب و جنوب شرقی دشت که دارای ۱۶ درصد از مساحت منطقه است، در محدوده آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. نقشه آسیب‌پذیری و نقشه‌های پارامترهای روش DRASTIC که شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) است در شکل (۲) نشان داده شده است. شاخص آسیب‌پذیری SINTACS برای منطقه مطالعاتی عددی بین ۶۶ تا ۱۵۱ به دست آمده که در سه گروه آسیب‌پذیری کم (۶۸-۴۴)، متوسط (۱۱۶-۶۸) و نسبتاً زیاد (۱۵۱-۱۱۶) قرار می‌گیرد. براساس نتایج حاصل از این روش، یک درصد از مساحت دشت در محدوده آسیب‌پذیری کم است که در شمال دشت واقع شده و ۶۹ درصد از مساحت دشت در محدوده آسیب‌پذیری متوسط است که بیش‌تر قسمت‌های شمالی، شمال شرقی و



شکل ۴. انطباق یون نیترات با نقشه‌های آسیب‌پذیری. الف) روش DRASTIC، ب) روش SINTACS، ج) روش ترکیبی (DSM)

جدول ۲. تطبیق چاه‌های اندازه‌گیری نیترات در سه سطح آلودگی با روش‌های ترکیبی، DRASTIC و SINTACS.

نیترات	روش DRASTIC			r	CI
	کم	متوسط	زیاد		
کم	۱	۷	۳	۰/۲۵	۶۱
متوسط	۰	۱۰	۴		
زیاد	۰	۰	۱		
نیترات	روش SINTACS			r	CI
	کم	متوسط	زیاد		
کم	۰	۸	۳	۰/۳۱	۵۹
متوسط	۰	۹	۵		
زیاد	۰	۰	۱		
نیترات	روش ترکیبی			r	CI
	کم	متوسط	زیاد		
کم	۱	۷	۳	۰/۵۳	۶۳
متوسط	۰	۱۲	۲		
زیاد	۰	۰	۱		

شاخص همبستگی (CI) به دست آمد که CI بالاتر به معنای همبستگی بیشتر است (۱۷). در جدول (۲)، سه سطح آلودگی نیترات و گروه‌های آسیب‌پذیری مربوط به هر کدام از روش‌های DRASTIC و SINTACS ارائه شده است. بر اساس CI محاسبه شده در جدول (۲)، روش DRASTIC شاخص همبستگی بیشتری نسبت به روش SINTACS دارد بنابراین برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری بهتر است.

برای محاسبه شاخص همبستگی (CI)، مقادیر نیترات به سه گروه نیترات کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی شدند سپس تعداد چاه‌هایی که مقادیر نیترات آن با نقشه‌های آسیب‌پذیری دارای ارزش یکسانی است و در یک گروه قرار دارند به سه، آن تعداد از چاه‌هایی که مقادیر نیترات و گروه آسیب‌پذیری آن به مقدار یک و دو اختلاف دارند به ترتیب در دو و یک ضرب شدند و سپس مقادیر حاصل با هم جمع بسته شد و

مطالعات انجام گرفته با روش‌های ترکیبی، نشان داده شده که روش‌های ترکیبی ارزیابی بهتری از آسیب‌پذیری ارائه می‌دهند. تفاوت اصلی پژوهش حاضر نسبت به مطالعات قبلی در نوع ترکیب کردن روش‌ها و یا مدل‌ها می‌باشد که تاکنون محققین از مدل‌های هوش مصنوعی و یا سایر روش‌ها برای ترکیب کردن روش‌ها استفاده کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش تعیین آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت خوی با استفاده از روش‌های DRASTIC و SINTACS و سپس ترکیب این دو روش به منظور استفاده از مزیت‌های هر دو روش در ارزیابی آسیب‌پذیری می‌باشد. برای این منظور در این پژوهش ابتدا نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از روش‌های DRASTIC و SINTACS تهیه شد و طبق نقشه آسیب‌پذیری به دست آمده ملاحظه گردید که این روش‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی متفاوت، نتایج متفاوتی را نیز ارائه می‌دهند که بر اساس آن امکان انتخاب یکی از این روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی میسر نیست. لذا برای دستیابی به یک نقشه واحد به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری، از ترکیب دو روش DRASTIC و SINTACS استفاده گردید که به این ترتیب از مزایای هر دو روش در ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده می‌شود. سپس به منظور صحت‌سنجی و مقایسه نتایج حاصل از هر کدام از روش‌ها، شاخص همبستگی (CI) و ضریب همبستگی (r) بین نقشه‌های آسیب‌پذیری و مقادیر نترات محاسبه شد. نتایج نشان داد که شاخص همبستگی و ضریب همبستگی روش ترکیبی بیش‌تر از روش‌های DRASTIC و SINTACS است. بر اساس نقشه آسیب‌پذیری حاصل از روش ترکیبی، آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی در سه گروه آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد که به ترتیب ۱۹، ۴۲، و ۳۹

با مقایسه نتایج حاصل از محاسبه ضریب همبستگی و شاخص همبستگی می‌توان به این نتیجه رسید که هر کدام از این معیارهای ارزیابی روش‌های متفاوتی را به عنوان روش بهتر ارائه می‌دهند. بنابراین انتخاب یکی از این روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری منطقی به نظر نمی‌رسد. در همین راستا در این تحقیق برای دستیابی به یک نتیجه واحد و ارائه یک روش به عنوان روش بهتر برای ارزیابی آسیب‌پذیری، از ترکیب دو روش DRASTIC و SINTACS استفاده گردید. که نتایج حاصل از روش ترکیبی در بخش بعدی ارائه شده است.

نتایج حاصل از روش ترکیبی

در روش ترکیبی با تلفیق نتایج حاصل از روش‌های DRASTIC و SINTACS در عین حال که از مزیت هر دو روش استفاده می‌کند در نهایت نیز به یک جواب واحد می‌رسد. برای این منظور جهت ترکیب دو روش فوق، ابتدا شاخص‌های آسیب‌پذیری هر دو روش با استفاده از رابطه (۴) نرمال‌سازی گردید و سپس با استفاده از رابطه (۳) شاخص آسیب‌پذیری کل با در نظر گرفتن شاخص همبستگی و شاخص آسیب‌پذیری مربوط به هر کدام از روش‌های DRASTIC و SINTACS محاسبه گردید و نقشه آسیب‌پذیری به روش ترکیبی تهیه شد (شکل ۴- ج). شاخص همبستگی (CI) و ضریب همبستگی (r) بین نقشه ترکیبی حاصل و میزان نترات به ترتیب برابر ۰/۵۳ و ۰/۵۳ به دست آمد که این مقادیر در روش ترکیبی بیش‌تر از دو روش DRASTIC و SINTACS است (جدول ۲). در نتیجه روش ترکیبی را می‌توان به عنوان یک روش بهتر برای ارزیابی آسیب‌پذیری معرفی کرد.

نتایج این پژوهش در تأیید نتایج مطالعات قبلی از جمله ندیری و همکاران (۱۸ و ۱۷)، قره‌خانی و همکاران (۵ و ۶) و جوانشیر و همکاران (۳) می‌باشد به طوری که در اکثر

مصنوعی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان

دشت اردبیل. اکوهیدرولوژی. ۲ (۳): ۳۱۱-۳۲۴.

۷. کلاتری، ن.، فاریابی، م. و رحیمی، م.ح. (۱۳۸۶).

بررسی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی دشت باغملک با

استفاده روش AVI و مدل‌های GOD و DRASTIC در

محیط GIS. زمین‌شناسی مهندسی. ۲: ۴۳۱-۴۵۰.

۸. نیک‌نام، ر.، محمدی، ک.، و جوهری مجد، و. (۱۳۸۶).

ارزیابی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی تهران- کرج

با روش DRASTIC و منطق فازی. تحقیقات منابع

آب ایران، سال سوم، شماره ۲، ۳۹-۴۷.

9. Aller, L., Bennet, T., Leher, H., Petty, R., J. & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydro-geological setting. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S Environmental Protection Agency Report, (EPA/600/2-87/035).
10. Antonakos, A.K. & Lambrakis, N.i. (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*, 288-304.
11. Babiker, I.S., Mohamed, M. A. A., Hiyama, T. & Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140.
12. Chilton, P.J., Vlugman, A. & Foster, S. (1990). A groundwater pollution risk assessment for public water supply sources in Barbados, American, Water Resources Association International Conference on Tropical Hydrology and Caribbean Water resource, San Juan de Puerto Rico, 279-289.
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 Acqiferi, Pitagora Edite, Bologna.
14. Corniello, A., Ducci, D. & Napolitano, P. (1997). Comparison between parametric methods to evaluate aquifer pollution vulnerability using a GIS: An example in the Piana Campana. In *Engineering Geology and the Environment*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 1721-1726.

درصد از وسعت دشت را به خود اختصاص می‌دهد و

آسیب‌پذیری آبخوان در قسمت‌های مرکزی و غربی دشت

بالاست و به سمت حاشیه آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد.

منابع

۱. استواری، ی.، بیگی هرچگانی، ح.ا. و داودیان، ع.ر. (۱۳۹۱). بررسی تغییرات مکانی نترات در آب زیرزمینی دشت لردگان. مدیریت آب و آبیاری. ۲ (۱): ۶۷-۵۵.
۲. جنوبی، ر.، رضایی، ح. و بهمنش، ج. (۱۳۹۲). مدیریت سطح آب زیرزمینی از طریق تلفیق آب سطحی و زیرسطحی با استفاده از مدل Modflow (مطالعه موردی دشت ارومیه). مدیریت آب و آبیاری. ۳ (۱): ۶۸-۴۹.
۳. جوانشیر، گ.، ندیری، ع.ا.، صادق‌فام، س. و عباس‌نوین‌پور، ا. (۱۳۹۵). ارائه روشی جدید به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت مغان بر مبنای ترکیب روش‌های دراستیک، سیتکس و اس‌آی. اکوهیدرولوژی. ۳ (۴): ۵۰۳-۴۹۱.
۴. رجایی، ط. و ابراهیمی، ه. (۱۳۹۳). مدل‌سازی نوسان‌های ماهانه آب زیرزمینی به وسیله تبدیل موجک و شبکه عصبی پویا. مدیریت آب و آبیاری. ۴ (۱): ۸۷-۷۳.
۵. قره‌خانی، م.، ندیری، ع.ا. و اصغری مقدم، ا. (۱۳۹۶). استفاده از مدل هوش مصنوعی مرکب نظارت‌شده برای بهبود مدل دراستیک (مطالعه موردی: آبخوان دشت اردبیل). علوم زمین. ۲۶ (۱۰۴): ۱۲۴-۱۱۳.
۶. قره‌خانی، م.، ندیری، ع.ا.، اصغری مقدم، ا. و صادقی‌اقدام، ف. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی مدل دراستیک با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی

15. Foster, S.S. (1987). Fundamental concept in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in: Van Duijvenbooden W., Van Weageningh, H.G. (E.Ds.), vulnerability of soils and Groundwater to pollution, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, proceeding and Information, 38, 69-86.
16. Nadiri, A.A., Gharakhani, M. & Khatibi, R. (2017). Assessment of groundwater vulnerability using supervised combine fuzzy logic model. *Environmental Science and Pollution Research Journal*, 24(9), 8562-8577.
17. Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Khatibi, R., Sadeghfam, S. & Asghari Moghaddam, A. (2017a). Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM). *Science of the Total Environment*, 574, 691-706.
18. Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R. & Gharakhani, M. (2017). Mapping vulnerability of multiple aquifer using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. *Science of Total Environment Journal*, 593-594, 75-90.
19. Panagopoulos, G., Antonakos, A. & Lambrakis, N. (2006). Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment, by the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14, 894-911.
20. Ribeiro, L. (2000). Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação. Nota interna, (não publicada), ERSHA-CVRM, 8 p.
21. Stigter, T.Y., Riberiro, L. & Carvalho, D.A.M.M. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinization and nitrate contamination level in two agriculture regions in the south of Portugal. *Hydrogel J*, 14, 79-99.
22. Van Stempvoort, D., Ewert, L. & Wassenaar L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 1, 25-37.
23. Vrba, J. & Zoporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise GmbH and Co, KG.