

ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش‌های SI و SINTACS ،DRASTIC

اصغر اصغری مقدم^۱
مریم قره‌خانی^۲
عطاالله نذیری^۳
مهدی کرد^۴
الهام فیجانی^۵

چکیده

افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی و صنایع باعث افزایش شدید در مصرف منابع آب و به تبع آن کاهش کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی شده است. افت گسترده در سطح تراز منابع آب زیرزمینی شیرین و نفوذ آب‌های سطحی و بارش‌ها به این منابع، جریان‌ات سطحی را با کاهش دراماتیک مواجه کرده و در اکثر مناطق ایران آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب کشاورزی، شرب و صنعت گردیده است. از این‌رو اهمیت مدیریت، حفاظت و جلوگیری از آلودگی این منابع به ضرورت اجتناب‌ناپذیری مبدل شده است. یکی از راهکارهای مناسب برای جلوگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان است. در این پژوهش به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اردبیل از روش‌های SI و SINTACS ،DRASTIC استفاده شده است. با استفاده

۱- استاد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

۳- استادیار، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

۴- استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان.

۵- استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران.

از این روش‌ها و با توجه به ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل عوامل آلاینده پهنه‌بندی شد و مناطق مستعد به آلودگی در هر کدام از روش‌ها مشخص شد. سپس برای صحت‌سنجی هر کدام از روش‌ها از مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده در منطقه استفاده شد. به‌منظور مقایسه بهتر و دقیق‌تر این روش‌ها، شاخص همبستگی (CI) بین نقشه‌های آسیب‌پذیری و مقادیر نیترات محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مدل DRASTIC بالاترین شاخص همبستگی را دارد و بنابراین برای ارزیابی آسیب‌پذیری روش بهتری نسبت به روش‌های دیگر است. بر اساس نتایج حاصل از مدل DRASTIC، ۴۴/۳۶ درصد از آبخوان دشت اردبیل که بیش‌تر شرق و قسمتی از جنوب دشت را شامل می‌شود در محدوده آسیب‌پذیری کم و بقیه قسمت‌های دشت یعنی بخش‌های شمالی و غربی در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد.

واژگان کلیدی: آسیب‌پذیری، دشت اردبیل، DRASTIC.

مقدمه

در سال‌های اخیر افزایش جمعیت و به‌دنبال آن افزایش نیازهای آبی و هم‌چنین کاهش کیفیت و آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌دلیل توسعه صنعت و کشاورزی موجب توجه به کیفیت منابع آب زیرزمینی شده است. یکی از راه‌های مؤثر برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب و کاربری اراضی است. عدم درک میزان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ممکن است سبب ایجاد آلودگی‌های شدید در این منابع شود و چه بسا میزان آسیب به حدی باشد که دیگر نتوان از این منابع استفاده کرد و برای رفع آلودگی و مصرف مجدد، باید وقت و هزینه زیادی صرف شود.

مفهوم آسیب‌پذیری برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه برای آگاهی بخشی در مورد آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است (Vrba and Zoporozec, 1994). آسیب‌پذیری را می‌توان به‌عنوان امکان نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی تعریف کرد. آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد.

(Antonakos and Lambrakis, 2007: 289). ارزیابی آسیب‌پذیری برای آلودگی آب‌های زیرزمینی بخشی از مدیریت آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان به‌شمار می‌رود. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد. این سه دسته عبارتست از رتبه‌دهی توصیفی، آماری و تحلیلی و روش ترکیبی (Niknam et al., 2007: 41). از مهم‌ترین روش‌های رتبه‌دهی می‌توان به روش‌های GOD، AVI، DRASTIC، SINTACS و SI اشاره نمود. این روش‌ها بر پایه تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده‌اند و اساس کار یکسانی دارند. همچنین این روش‌ها در به‌کارگیری نوع و تعداد پارامترها با هم تفاوت داشته ولی در نهایت منجر به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی می‌گردند.

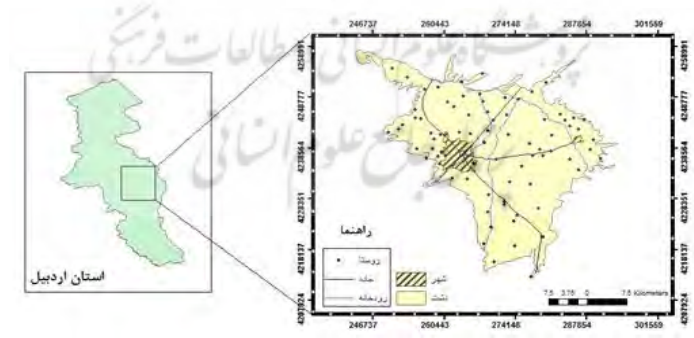
در کشورهای مختلف جهان ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با روش‌های مختلف و به‌طور عمده به‌وسیله روش DRASTIC انجام شده است. در تحقیقی که در ایتالیا انجام شده به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی از چهار مدل DRASTIC، SINTACS، GOD و AVI استفاده کرده‌اند. آن‌ها در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که محدوده کلاس آسیب‌پذیری DRASTIC وسیع‌تر از روش SINTACS است و روش SINTACS به پارامترهای مرتبط با نوع بهره‌وری زمین اهمیت بیشتری می‌دهد (Corniello et al., 1997: 1721). در ناحیه متلین-راس در شمال تونس با استفاده از مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI به بررسی نواحی با بیش‌ترین پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی پرداختند و به این نتایج رسیدند که مدل SI در مقایسه با سایر مدل‌های ذکر شده کارایی بیش‌تری در تعیین مناطق مستعد آلودگی دارد و روش‌های DRASTIC و SINTACS ماهیت آلاینده و کاربری زمین را به‌عنوان عامل مدیریتی آسیب‌پذیری ویژه در نظر نمی‌گیرد (Hamza et al., 2007: 493). در ایران در تحقیقی، پتانسیل آلودگی دشت باغملک با استفاده از روش‌های DRASTIC، GOD و AVI مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق نتایج حاصل از سه روش مذکور با هم مقایسه شده و مشخص

گردید که مدل DRASTIC به‌طور دقیق‌تری محدوده‌های مختلف دارای پتانسیل آلودگی را مشخص کرده است (کلاتری و همکاران، ۱۳۸۶: ۴۳۱).

دشت اردبیل از مناطق فعال کشاورزی، دامداری و صنعت است که در آن از کودهای کشاورزی زیاد استفاده می‌شود. این مواد به‌همراه پساب‌ها و فاضلاب‌های حاصل از منطقه می‌تواند آب‌های زیرزمینی را آلوده سازند. بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان این دشت ضرورت دارد. لذا هدف از این مطالعه، بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی آبخوان دشت اردبیل به‌منظور تعیین مناطق با پتانسیل بالای آلودگی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI و مقایسه نتایج و انتخاب بهترین روش است.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی موردنظر آبخوان دشت اردبیل است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود دشت اردبیل در شمال غرب ایران و در استان اردبیل قرار دارد. این دشت توسط ارتفاعات که بخشی از رشته کوه البرز هستند، احاطه شده و دارای وسعتی در حدود ۹۹۰ کیلومتر مربع است. دشت اردبیل دشتی نسبتاً هموار است که از اطراف توسط کوه‌های بزقوش، تالش و سیلان احاطه شده و تنها خروجی منابع آبی دشت در منتهی‌الیه شمال غربی آن واقع شده است. این دشت دارای سه رودخانه اصلی قره‌سو، بالخلوچای و قوری چای است. نوران‌چای، هیرچای و شهریورچای نیز از دیگر رودهای این دشت می‌باشند (کرد، ۱۳۹۳: ۴۶).



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

مدل دراستیک یک مدل کمی است که برای برآورد پتانسیل آلودگی سیستم آب زیرزمینی در یک مقیاس ناحیه‌ای طراحی شده است. 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 (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۴). این مدل براساس هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی است که شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه غیراشباع (I) و ضریب هدایت هیدرولیکی (C) می‌باشد. اطلاعات حاصل از این پارامترها به صورت تلفیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سپس توسط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پردازش می‌شوند (حجازی، ۱۳۹۳: ۱۴۱). در روش دراستیک به هر پارامتر یک رتبه و یک وزن (از ۱ تا ۵) برحسب اهمیت پارامتر اختصاص داده می‌شود. رتبه پارامترهای دراستیک بین ۱ تا ۱۰ متغیر است، به طوری که ۱ به معنای کم‌ترین و ۱۰ بیش‌ترین خطر برای آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود (Panagopoulos et al., 2005). از این رو شاخص دراستیک براساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر با فرمول (۱) محاسبه می‌شود (Aller et al., 1987).

$$CrCw + IrIw + TrTw + SrSw + ArAw + RrRw + DrDw = DI \quad (1)$$

در رابطه بالا، DI شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای هفت‌گانه و r نرخ ارزش (رتبه) و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود.

۱- عمق آب زیرزمینی: فاصله بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی، عمق برخورد را مشخص می‌کند. برای تهیه نقشه عمق آب زیرزمینی، ابتدا موقعیت و عمق سطح ایستابی چاه‌های موجود در منطقه به محیط اکسل وارد و سپس به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزار GIS تبدیل شد. به منظور ایجاد این لایه به حالت رستری و برای تلفیق با لایه‌های دیگر، از روش Kriging برای تهیه نقشه عمق آب زیرزمینی استفاده شد.

- ۲- تغذیه آب زیرزمینی: تغذیه خالص مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح ایستابی می‌رسد. برای ایجاد این لایه از بیلان آب زیرزمینی استفاده شد و میزان تغذیه محاسبه گردید و بعد از درونیابی و رتبه‌دهی نقشه تغذیه آب زیرزمینی تهیه شد.
- ۳- محیط آبخوان: این عامل به خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده منطقه اشباع مانند میزان تخلخل، جنس، اندازه ذرات و جورشدگی ذرات اشاره دارد. برای تهیه نقشه محیط آبخوان، با استفاده از لاگ چاه‌های منطقه جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (بخش اشباع) مشخص شد و به هر کدام از آن‌ها نرخ اختصاص یافت. سپس با اعمال درونیابی لایه محیط آبخوان به‌دست آمد.
- ۴- محیط خاک: محیط خاک تأثیر مهمی در چگونگی تغذیه و متعاقب آن بر چگونگی حرکت آلاینده دارد. وجود مواد با بافت ریزدانه مانند سیلت و رس، تراوایی خاک را کاهش می‌دهد و برعکس مواد دانه درشت‌تر مانند شن، نفوذپذیری خاک و در نتیجه قابلیت انتقال آلاینده‌ها به سیستم آب زیرزمینی را افزایش می‌دهند. برای تهیه این نقشه از نقشه خاک رقومی شده منطقه استفاده شد و نقشه محیط خاک تهیه گردید.
- ۵- توپوگرافی: این لایه به تغییرات شیب سطح زمین مربوط می‌شود. برای تهیه این لایه از مدل ارتفاعی رقومی منطقه استفاده شد و سپس نقشه شیب از مدل ارتفاعی رقومی استخراج شد و نرخ‌دهی انجام گردید.
- ۶- محیط غیراشباع: منطقه غیراشباع، رسوبات موجود از سطح ایستابی تا زون خاک را شامل می‌شود. برای تهیه این نقشه از روشی مشابه لایه محیط آبخوان استفاده شد، با این تفاوت که از ضخامت و جنس لایه‌های بالای سطح ایستابی در لاگ چاه‌ها استفاده گردید.
- ۷- هدایت هیدرولیکی: این لایه مربوط به نفوذپذیری سفره یا توانایی مواد سفره به منظور انتقال آب یا مواد محلول می‌باشد. برای تهیه این لایه ابتدا به‌منظور محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان از اطلاعات موجود در منطقه از جمله داده‌های قابلیت انتقال و ضخامت اشباع آبخوان استفاده شد و میزان هدایت هیدرولیکی به‌دست آمد. بدین ترتیب این اطلاعات

به محیط اکسل وارد و سپس به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزار ARC GIS تبدیل شد. سپس با استفاده از روش Kriging درونیابی شد و رتبه‌دهی انجام گرفت و نقشه هدایت هیدرولیکی تهیه گردید.

پس از تهیه مشخصه‌های موردنیاز برای ارزیابی آسیب‌پذیری به روش دراستیک، از تلفیق هفت پارامتر براساس رابطه (۱) شاخص آسیب‌پذیری به دست می‌آید. کلاس‌بندی و ارزش‌گذاری کلاس‌های مربوط به هر کدام از پارامترها و همچنین وزن‌دهی پارامترها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) وزن‌ها، کلاس‌بندی و ارزش‌گذاری کلاس‌های مربوط به هر کدام از پارامترهای مدل DRASTIC

توپوگرافی (درصد)		محیط خاک		محیط آبخوان		تغذیه (سانتی‌متر در سال)		عمق آب زیرزمینی (متر)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱۰	۰ - ۲	۴	لوم سیلتی	۳	رس و سیلت با کمی ماسه	۱	۰ - ۵/۰۸	۱۰	۰ - ۱/۵
۹	۲ - ۶	۶	لوم ماسه‌ای	۳	کمی ماسه	۳	۵/۰۸ - ۱۰/۱۶	۹	۱/۵ - ۴/۶
۵	۶ - ۱۲	۷	ماسه لومی	۵	ماسه با کمی سیلت و رس	۶	۱۰/۱۶ - ۱۷/۷۸	۷	۴/۶ - ۹/۱
۳	۱۲ - ۱۸	۸	گراول و ماسه	۸	سیلت و رس	۸	۱۷/۷۸ - ۲۵/۴	۵	۹/۱ - ۱۵/۲
۱	۱۸ <			۸	ماسه و گراول	۹	۲۵/۴ <	۳	۱۵/۲ - ۲۲/۹
								۲	۲۲/۹ - ۳۰/۵
								۱	۳۰/۵ <
وزن: ۱		وزن: ۲		وزن: ۳		وزن: ۴		وزن: ۵	
هدایت هیدرولیکی (متر در روز)									
محیط غیراشباع					محیط اشباع				
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱	۴ >	۲	رس و سیلت	۲	سیلت و رس	۲	سیلت و رس	۱	سیلت و رس
۲	۴ - ۱۲	۴	سیلت و رس با کمی ماسه	۴	سیلت و رس با کمی ماسه	۴	سیلت و رس با کمی ماسه	۲	سیلت و رس با کمی ماسه
۴	۱۲ - ۲۸	۶	ماسه با اندکی سیلت و رس	۶	ماسه با اندکی سیلت و رس	۶	ماسه با اندکی سیلت و رس	۴	ماسه با اندکی سیلت و رس
		۸	گراول و ماسه	۸	گراول و ماسه	۸	گراول و ماسه		
وزن: ۳					وزن: ۵				

مدل SINTACS

به‌دنبال روش DRASTIC، روش SINTACS نیز به‌منظور بررسی آسیب‌پذیری ارائه شد. این روش اولین بار توسط سیویتا و همکاران در سال ۱۹۹۰ برای بررسی آسیب‌پذیری جنوب ایتالیا به کار برده شده 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 به کار رفته است. روش SINTACS از روش DRASTIC مشتق شده است. در حقیقت پارامترهای این روش همان پارامترهای روش دراستیک است ولی با این تفاوت که فرآیند وزن و رتبه‌دهی پارامترها در روش SINTACS انعطاف بیشتری دارد (Civita, 1990). به هر کدام از پارامترها بر اساس تأثیر و اهمیتی که در آسیب‌پذیری ذاتی دارد رتبه‌ای بین ۰ تا ۱۰ و یک وزن نسبی بین ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود و در نهایت شاخص آسیب‌پذیری با رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در رابطه زیر، P_i رتبه هر پارامتر و W_i وزن نسبی پارامترهاست.

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i \quad (2)$$

روش تهیه لایه‌های مدل SINTACS همانند مدل دراستیک است و فقط رتبه‌دهی و وزن‌دهی در این روش متفاوت از روش دراستیک است که این وزن‌دهی و رتبه‌دهی مطابق جدول (۲) انجام شده است. سپس شاخص آسیب‌پذیری SINTACS با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید.

جدول (۲) محدوده، نرخ پارامترها و وزن‌های مدل SINTACS (Majandang and Sarapirome, 2013: 2030)

محیط آبخوان		نوع خاک		منطقه غیراشباع		تغذیه (میلی‌متر در سال)		عمق آب زیرزمینی (متر)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۸	گراول یا کمی ماسه	۱	رس و سیلت	۲	رس	۱	۰-۲۵	۹	۰-۲/۵
۷	ماسه	۴	لوم سیلتی	۳	سیلت	۲	۲۵-۴۰	۸	۲/۵-۴/۵
۵	ماسه	۵	لوم ماسه‌ای	۴	رس ماسه‌ای	۳	۴۰-۶۵	۷	۴/۵-۶
۳	رس و سیلت	۶	ماسه لومی	۵	ماسه رسی	۴	۶۵-۹۰	۶	۶-۸
	وماسه	۸	گراول	۷	ماسه	۵	۹۰-۱۱۰	۵	۸-۱۰
	رس و سیلت			۸	گراول	۶	۱۱۰-۱۳۵	۴	۱۰-۱۷
	وزن: ۳		وزن: ۴		وزن: ۵		۱۳۵-۱۶۵	۳	۱۷-۲۵
	توپوگرافی		هدایت هیدرولیکی (متر در ثانیه)				۱۶۵-۱۹۰	۲	۲۵-۴۰
	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده			۱۹۰-۲۳۵	۱	۴۰<
۹	۰-۲	۴	۳×۱۰ ^{-۶} -۵/۵×۱۰ ^{-۶}	۱۰	۲۳۵-۲۷۵		۲۳۵-۲۷۵		
۸	۲-۴	۵	۵/۵×۱۰ ^{-۶} -۱×۱۰ ^{-۵}	۹	۲۷۵-۳۱۵		۲۷۵-۳۱۵		
۷	۴-۶	۶	۱×۱۰ ^{-۵} -۳×۱۰ ^{-۵}	۸	۳۱۵-۳۵۰		۳۱۵-۳۵۰		
۶	۶-۹	۷	۳×۱۰ ^{-۵} -۹×۱۰ ^{-۵}	۷	۳۵۰-۳۷۵		۳۵۰-۳۷۵		
۵	۹-۱۲	۸	۹×۱۰ ^{-۵} -۳×۱۰ ^{-۴}	۶	۳۷۵-۴۰۰		۳۷۵-۴۰۰		
۴	۱۲-۱۵			۵	۴۰۰-۴۳۵		۴۰۰-۴۳۵		
۳	۱۵-۱۸			۴	۴۳۵-۵۱۰		۴۳۵-۵۱۰		
۲	۱۸<								
	وزن: ۲		وزن: ۳		وزن: ۴		وزن: ۵		

مدل SI

روش SI نیز برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به مواد آلاینده ارائه شده است. در این روش پنج پارامتر عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، توپوگرافی (T) و کاربری اراضی (LU) مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر پارامتر براساس واحدهای تشکیل‌دهنده، بین ۱۰ تا ۱۰۰ ارزش‌گذاری شده و پس از وزن‌دهی و تلفیق، شاخص نهایی SI بر اساس رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

$$SI = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + T_R T_W + LU_R LU_W \quad (3)$$

نحوه تهیه لایه‌های عمق آب زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان و توپوگرافی همانند روش دراستیک می‌باشد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی استفاده شد و رتبه‌دهی انجام گرفت به طوری که برای مناطق کشاورزی، بیش‌ترین رتبه (۹۰) و برای مراتع، کم‌ترین رتبه اختصاص یافت. رتبه‌دهی چهار پارامتر دیگر مدل SI مشابه روش دراستیک است با این تفاوت که محدوده رتبه‌ها در این روش بر خلاف روش دراستیک بین ۱۰ تا ۱۰۰ است. اما وزن‌دهی آن متفاوت است که وزن هر کدام از پارامترها در جدول (۳) آورده شده است. سپس بر اساس رابطه (۳) شاخص نهایی SI محاسبه گردید.

جدول (۳) وزن‌دهی پارامترهای مدل SI

پارامتر	عمق آب زیرزمینی	تغذیه خالص	محیط آبخوان	توپوگرافی	کاربری اراضی
وزن	۰/۱۸۶	۰/۲۱۲	۰/۲۵۹	۰/۱۲۱	۰/۲۲۲

یافته‌ها و بحث

نقشه‌های پارامترهای مدل دراستیک به صورت هفت لایه رستری تهیه شد که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. این هفت لایه رستری در محیط نرم‌افزار ArcGIS بر اساس تابع هم‌پوشانی تلفیق شد و نقشه آسیب‌پذیری دشت اردبیل تهیه گردید (شکل ۳). با توجه به این که لایه‌های مورد نظر در مدل دراستیک هر یک دارای وزن خاصی بودند، برای ترکیب و تلفیق داده‌ها از تابع هم‌پوشانی وزنی از طریق منوی Raster calculator در نرم‌افزار ArcGIS برای تلفیق لایه‌ها استفاده شد.

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک برای دشت اردبیل بین ۸۲ تا ۱۵۱ بدست آمد که با توجه به طبقه‌بندی آلر و همکاران (۱۹۸۷) آسیب‌پذیری دشت اردبیل در دو گروه آسیب‌پذیری کم (۸۲ - ۱۲۰) و متوسط (۱۵۱ - ۱۲۱) قرار می‌گیرد. بیش‌ترین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مربوط به آسیب‌پذیری متوسط است که ۵۵/۶۴ درصد از منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد این رده بخش‌هایی در نواحی شمالی و غربی را به خود اختصاص داده است.

شرق و قسمتی از جنوب دشت در محدوده آسیب‌پذیری کم قرار دارد که ۴۴/۳۶ درصد از منطقه را شامل می‌شود.

نتایج حاصل از مدل SINTACS

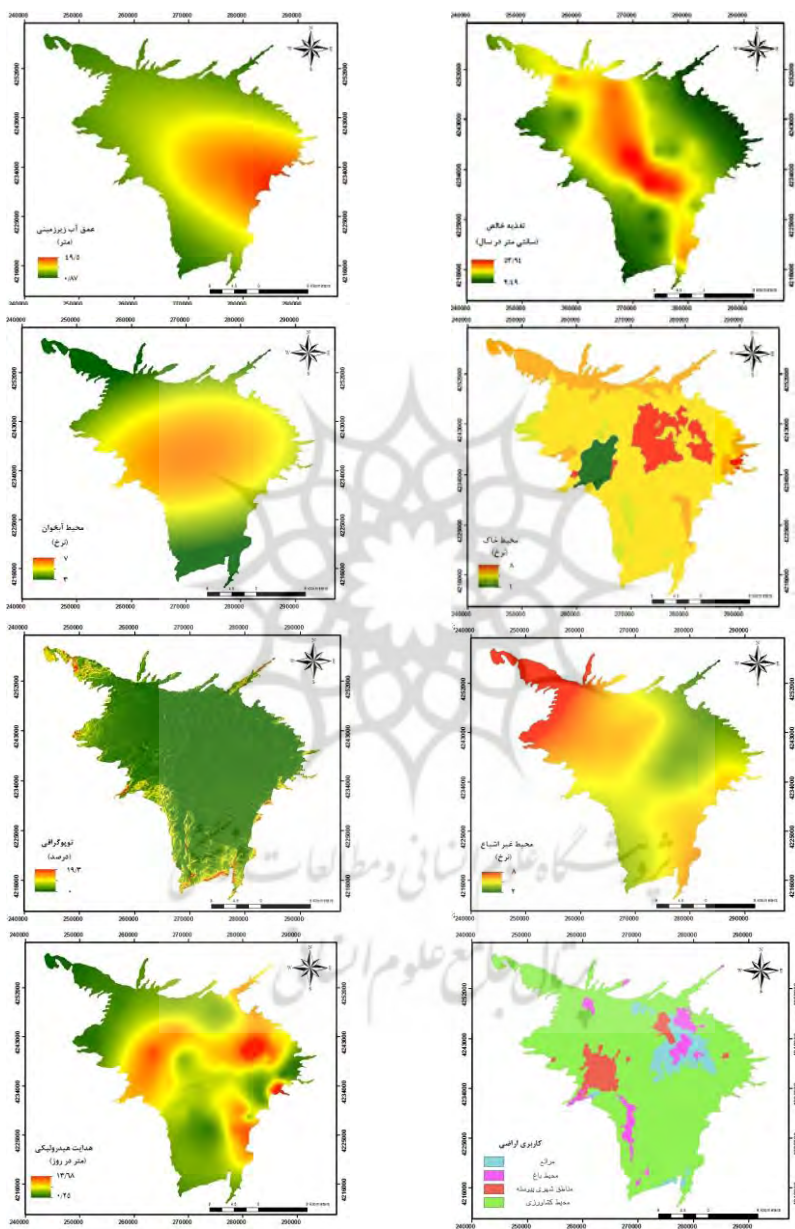
نقشه‌های مربوط به هر کدام از پارامترهای مدل SINTACS همانند نقشه‌های مدل دراستیک بود که در شکل (۲) نشان داده شده است. شاخص SINTACS برای دشت اردبیل با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی رتبه‌بندی شده و بر اساس رابطه (۲) و جدول (۲) محاسبه گردید و نقشه آسیب‌پذیری به‌دست آمد (شکل ۳).

شاخص SINTACS عددی بین ۱۱۷ تا ۱۸۸ بدست آمد که در دو گروه آسیب‌پذیری متوسط (۱۱۷-۱۴۰) و نسبتاً زیاد (۱۴۱-۱۸۸) قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج حاصل از روش SINTACS حدود ۱۰/۵ درصد از دشت در محدوده با آسیب‌پذیری متوسط و بخش عمده‌ای از آن حدود ۸۹/۵ درصد در محدوده آسیب‌پذیری نسبتاً زیاد قرار دارد.

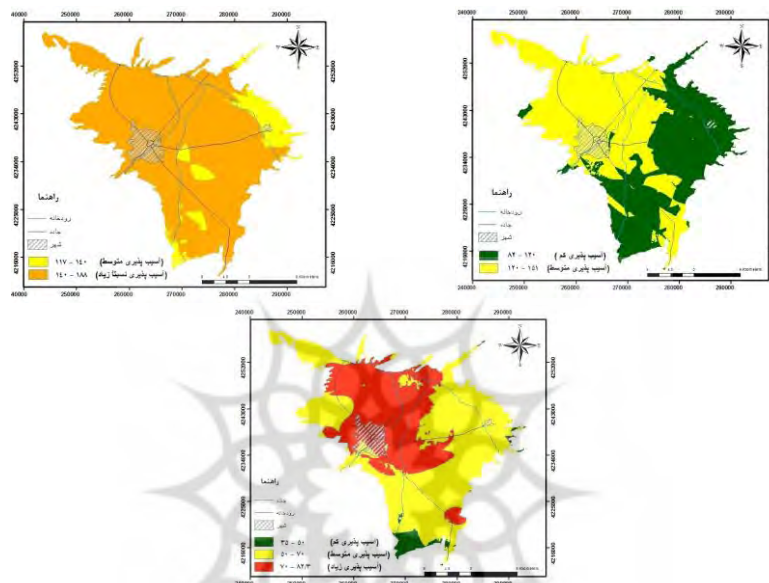
نتایج حاصل از مدل SI

پس از تهیه نقشه پارامترهای پنج گانه مورد نیاز (شکل ۲) و رتبه‌دهی و وزن‌دهی آن، شاخص SI محاسبه گردید و نقشه آسیب‌پذیری به روش SI تهیه شد (شکل ۳).

شاخص آسیب‌پذیری برای دشت اردبیل به روش SI بین ۳۵ تا ۸۲/۳ بدست آمد. که به طور عمده در سه گروه آسیب‌پذیری کم (۳۵-۵۰)، متوسط (۵۰-۷۰) و زیاد (۷۰-۸۲/۳) قرار می‌گیرد. بخش کوچکی از جنوب دشت حدود ۲/۸ درصد آسیب‌پذیری کم، حدود ۳۸/۴ درصد از دشت که بخش‌های شمال و غرب دشت را شامل می‌شود آسیب‌پذیری زیاد و بقیه قسمت‌های دشت حدود ۵۸/۸ درصد از دشت آسیب‌پذیری متوسط را نشان داد.



شکل (۲) نقشه‌های پارامترهای مدل DRASTIC (a, b, c, d, e, f, g)، نقشه‌های پارامترهای مدل SI (a, b, c, e, h) و نقشه‌های پارامترهای مدل SINTACS (a, b, c, d, f, g, e)



شکل (۳) نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت اردبیل به روش‌های الف) DRASTIC، ب) SINTACS و ج) SI

صحت‌سنجی مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI

با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه، کشاورزی از رونق خاصی برخوردار بوده و غالباً از کودهای حیوانی و یا کودهای شیمیایی نیتراتی استفاده می‌شود بنابراین برای صحت‌سنجی مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI از مقادیر اندازه‌گیری شده نیترات موجود در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. با انطباق مقادیر یون نیترات بر روی هر کدام از نقشه‌های آسیب‌پذیری مشاهده شد که نقشه آسیب‌پذیری حاصل از مدل DRASTIC نسبت به دو مدل دیگر مطابقت بیشتری با مقادیر نیترات دارد (شکل ۴).

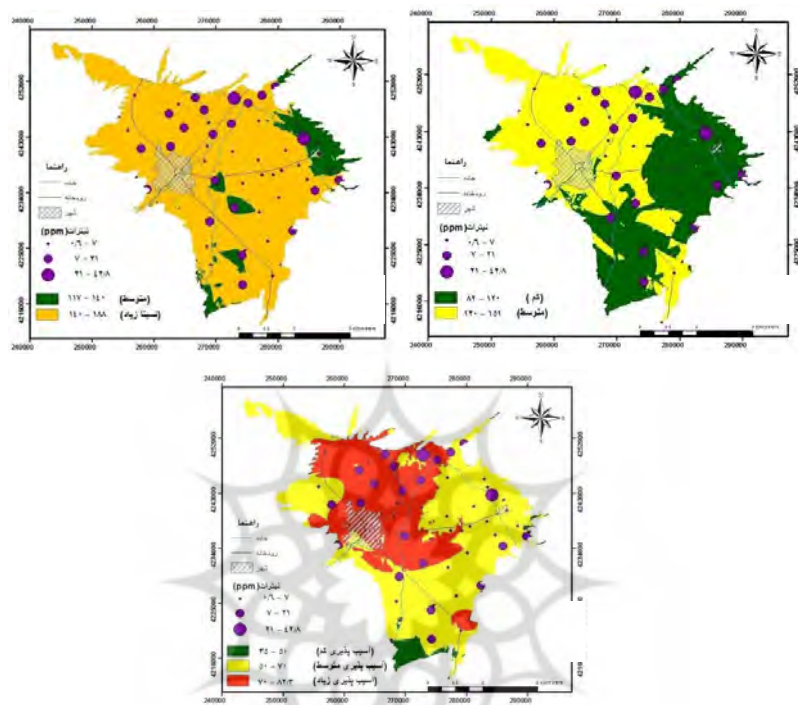
در همین راستا برای بررسی دقیق‌تر و هم‌چنین مقایسه سه مدل آسیب‌پذیری با هم، از روش محاسبه شاخص همبستگی (CI) بین مدل‌های مختلف آسیب‌پذیری و داده‌های

نیترات استفاده گردید. برای این منظور مقادیر نیترات به سه گروه نیترات کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی می‌شود سپس تعداد چاه‌هایی که مقادیر نیترات آن با نقشه‌های آسیب‌پذیری دارای ارزش یکسانی است و در یک گروه قرار دارند به ۳ ضرب می‌شوند. آن تعداد از چاه‌هایی که مقادیر نیترات و گروه آسیب‌پذیری آن به مقدار ۱ و ۲ اختلاف دارند به ترتیب در ۲ و ۱ ضرب می‌شوند. سپس مقادیر حاصل باهم جمع بسته می‌شود و شاخص همبستگی (CI) به دست می‌آید که این می‌تواند همبستگی بین مدل‌های آسیب‌پذیری و مقادیر نیترات را نشان دهد. CI بالاتر به معنی همبستگی بیش‌تر است (Fijani et al., 2013: 98).

انطباق چاه‌های با سه سطح آلودگی نیترات و دسته‌های آسیب‌پذیری پیش‌بینی شده به وسیله مدل‌های DRASTIC, SINTACS, SI در جدول (۴) ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از سه مدل آسیب‌پذیری در جدول ۶، مدل DRASTIC، بیش‌ترین شاخص همبستگی (CI) را دارد ولی مدل‌های SI و SINTACS به ترتیب دارای شاخص همبستگی پایین‌تری هستند. از آنجایی که مدل DRASTIC بالاترین شاخص همبستگی را دارد، دارای اولویت بیش‌تری است و نسبت به بقیه روش‌ها در تعیین مناطق آسیب‌پذیر از اهمیت بیش‌تری برخوردار است.

جدول (۴) تطبیق چاه‌های اندازه‌گیری نیترات در سه سطح آلودگی با مدل‌های DRASTIC, SINTACS و SI

	نیترات			CI			نیترات			CI
	کم	متوسط	زیاد				کم	متوسط	زیاد	
DRASTIC کم متوسط				۱۴۸	SI کم متوسط زیاد				۱۱۸	
	۲۱	۸	۱			۳	۰	۰		
	۱۵	۱۲	۱			۲۲	۸	۱		
SINTACS متوسط نسبتاً زیاد				۹۱						
	۷	۳	۱		۱۰	۱۳	۱			
	۲۹	۱۷	۱							



شکل (۴) انطباق یون نترات با نقشه‌های آسیب‌پذیری، الف) مدل DRASTIC، ب) مدل SINTACS، ج) مدل SI

مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج تحقیقات انجام شده برای دشت ملایر (معروفی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۴۱) و هم‌چنین دشت اندیمشک (آصفی و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۹) نشان می‌دهد که نتایج این پژوهش‌ها بسیار به هم نزدیک است یعنی در هر سه تحقیق انجام شده، مدل دراستیک به‌عنوان بهترین مدل برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی معرفی شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش آسیب‌پذیری آبخوان دشت اردبیل با مدل‌های SINTACS, DRASTIC و SI بررسی شده است. به‌منظور اطمینان از نتایج روش‌های مورد استفاده، از مقادیر نیترا موجود در آب زیرزمینی برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد و مشاهده گردید که مدل DRASTIC هم‌خوانی بیش‌تری را با لایه نیترا دارد. سپس برای مقایسه بهتر و دقیق‌تر، شاخص همبستگی سه مدل آسیب‌پذیری محاسبه گردید و نتایج نشان داد که مدل DRASTIC بالاترین همبستگی را با لایه نیترا دارد که این نشان‌دهنده کارآمدتر بودن مدل دراستیک در تعیین مناطق آسیب‌پذیر در دشت می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل از مدل DRASTIC، ۴۴/۳۶ درصد از آبخوان دشت اردبیل که بیش‌تر شرق و قسمتی از جنوب دشت را شامل می‌شود در محدوده آسیب‌پذیری کم و بقیه قسمت‌های دشت یعنی بخش‌های شمالی و غربی در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد که این بیش‌تر به‌علت عمق کم‌سطح ایستابی و جنس رسوبات منطقه غیراشباع در این مناطق است. با توجه به تأثیر زیان بار آلودگی بر کیفیت آب زیرزمینی، به‌منظور حفاظت از منابع آب زیرزمینی بهتر است که در مناطق با آسیب‌پذیری بالا از کودهای شیمیایی در فعالیتهای کشاورزی زیاد استفاده نشود و هم‌چنین از ایجاد واحدهای صنعتی مولد آلودگی در این مناطق جلوگیری شود.

منابع

- اصغری مقدم، اصغر؛ فیجانی، الهام و عطاالله ندیری (۱۳۸۸)، «ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت‌های بازرگان و پلدشت با استفاده از مدل دراستیک بر اساس GIS»، *مجله محیط‌شناسی*، شماره ۵۲، صص ۵۵-۶۴.
- آصفی، مهرناز؛ رادمنش، فریدون و حیدر زارعی (۱۳۹۳)، «بهینه‌سازی مدل‌های DRASTIC و SINTACS مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی»، *مجله محیط‌شناسی*، شماره ۱، صص ۹۴-۷۹.
- کرد، مهدی (۱۳۹۳)، «مدل‌سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه‌سازی برداشت آن»، رساله دکتری، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.
- کلانتری، نصراله؛ فاریابی، محمد و محمدحسین رحیمی (۱۳۸۶)، «بررسی نیروی آلودگی آب زیرزمینی دشت باغملک با استفاده از روش AVI و مدل‌های GOD و DRASTIC در محیط GIS»، *نشریه زمین‌شناسی مهندسی*، شماره ۲، صص ۴۳۱-۴۵۰.
- معروفی، صفر؛ سلیمانی، سامره؛ قبادی، محمدحسین؛ رحیمی، قاسم و حسین معروفی (۱۳۹۱)، «ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملایر با استفاده از مدل‌های DRASTIC، SI و SINTACS»، *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، شماره سوم، صص ۱۴۱-۱۶۶.
- Aller, Linda; Bennet, Truman; Leher, Jay.H; Petty, Rebecca.J and Hackett, Glen (1987), DRASTIC: A Standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydro-geological settings, Kerr Environmental Research Laboratory, U.S Environmental Protection Agency Report, (EPA/600/2-87/035).
- Antonakos, Andreas.K and Lambrakis, Nikolaos. 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*, PP. 288-304.
- Civita, Massimo. (1990), *Legenda unificata(per let Cartea dellai vulnerabilita dei corpi idrici sotterranei/ Unified legend for the*

- aquifer pollution vulnerability Maps, Studi Sulla Vulnerabilita degli Acquiferi , Pitagora Edit, Bologna.
- Corniello, Alfonso; Ducci, Daniela and Napolitano, Paola. (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.
- Fijani, Elham; Nadiri, Ata.Allah; Asghari Moghaddam, Asghar; Tsai, Frank T-C and Dixon, Barnali. (2013), Optimization of DRASTIC Method by Supervised Committee Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran , *Journal of Hydrology*, 530, PP.89-100.
- Hamza, Mohamed. Hafedh; Added, Ayed; France's, Alain and Rodriguez, Ramiro. (2007), Validite de l application des methodes de vulneabilite DRASTIC, SINTACS et SI a l etude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline Ras Jebel° Raf Raf, *Comptes Rendus Geoscience*, 339, PP.493-505.
- Majandang, Jiradech and Sarapirome, Sunya. (2013), Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model , *Environ Earth Science*, Vol. 68, PP.2025-2039.
- Niknam, Ramin; Mohammadi, Kourosch and Majd, Vahid. Johari. (2007), Groundwater Vulnerability Evaluation of Tehran-Karaj Aquifer Using DRASTIC Method and Fuzzy Logic , *Iran Water Resources Research*, Vol 2, PP. 39-47.
- Panagopoulos, George; Antonakos, Andreas and Lambrakis, Nicolaos. (2005), Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment, by the use of simple statistical methods and GIS , *Hydrogeology Journal* (published online).
- Vrba, Jiri and Zoporozec, Alexander. (1994), Guidebook on mapping groundwater vulnerability , *International Contributions to Hydrogeology*, Verlag Heinz Heise GmbH and Co, KG.