

اصلاح روش DRASTIC در ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی با استفاده از دو روش تحلیل حساسیت تک پارامتری SPSA و روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP

سیده حمیده ابراهیمی^۱، امین رضا نشاط^{۲*}، سامان جوادی^۲، حسین آقامحمدی^۲

۱. دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده محیط زیست و انرژی،

دانشگاه علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران

۲. استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی،

واحد علوم و تحقیقات تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۶/۲۵)

چکیده

ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی تأثیری کلیدی در حفاظت و بهره برداری صحیح از این منابع استراتژیک دارد. روش های گوناگونی برای ارزیابی آسیب پذیری پیشنهاد شده است که متداول ترین آن مدل DRASTIC است. عبارت DRASTIC مخفف هفت پارامتر کنترل کننده آلودگی در سیستم هیدروژئولوژیکی است. مشکل اصلی این روش ثابت بودن میزان رتبه و وزن پارامترهای به کار رفته در این مدل است. هدف اصلی پژوهش حاضر اصلاح وزن های اولیه مدل با دو روش تحلیل حساسیت تک پارامتری SPSA و روش تحلیل سلسله مراتبی AHP و در نهایت تولید نقشه با استفاده از قابلیت های محیط نرم افزار ArcGIS طبق شرایط منطقه مطالعاتی است. دشت یاسوج واقع در جنوب غربی ایران به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. با استفاده از شاخص غلظت نترات ۲۴ حلقه چاه واقع در محدوده مطالعاتی و محاسبه ضریب همبستگی پیرسون، درجه و میزان ارتباط خطی بین نتایج روش ها با واقعیت موجود در منطقه، محاسبه شد. روش SPSA با تخصیص وزن مؤثر هر پارامتر ورودی در هر پلیگون و مقایسه آن با وزن تئوریک اختصاص یافته توسط مدل، بیشترین همبستگی را با نمونه های نترات منطقه نشان داد. همچنین، در روش AHP بر پایه قضاوت کارشناسی، برای هفت پارامتر موجود در مدل براساس اهمیت و کارکردی که در تعیین آسیب پذیری آبخوان داشتند، نسبت های جدیدی به کار گرفته شد و نتایج نسبت به مدل DRASTIC پایه بهبود یافت. نقشه های به دست آمده از تعیین آسیب پذیری پس از اجرا در نهایت می تواند با بررسی منابع آلاینده در سطح زمین برای تعیین حریم کیفی و ارزیابی خطر آلودگی منابع آب زیرزمینی استفاده شود.

کلیدواژگان: آسیب پذیری آب زیرزمینی، تحلیل سلسله مراتبی AHP، تحلیل حساسیت تک پارامتری SPSA، دشت یاسوج، ArcGIS.

مقدمه

در شرایط کنونی، بخش درخور توجهی از مصارف آب کشور به خصوص در بخش شرب توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که بیشتر از آبخوان‌های آزاد است، در حالی که این آبخوان‌ها آسیب‌پذیری و حساسیت بیشتری در مقابل آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهرنشینی دارند. در بسیاری از موارد آلودگی آب زیرزمینی، بعد از آلوده شدن چاه‌های آب شرب شناسایی می‌شوند. ورود آب زیرزمینی به دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها سبب آلودگی منابع آب سطحی نیز می‌شود که به دنبال آن عواقب زیست‌محیطی خطرناکی به وقوع خواهد پیوست. به دلیل معقول نبودن فرایند احیای آبخوان در یک دوره زمانی معلوم، اجرای سیاست‌های پیشگیرانه مبنای اصلی کار قرار گرفته است، به طوری که امروزه کیفیت آبخوان بیشترین اهمیت در مدیریت آب‌های زیرزمینی را دارد [۱]. به این منظور، از مهم‌ترین ابزارهای تحقق این امر، تعیین حریم کیفی این منابع است. اولین گام در تعیین حریم کیفی یک آبخوان، تهیه نقشه آسیب‌پذیری آن آبخوان است، زیرا آسیب‌پذیری حساسیت منبع آب زیرزمینی را نسبت به آلودگی با در نظر گرفتن متغیرهای هیدروژئولوژیکی نشان می‌دهد [۲]. روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با دقت زیاد ارائه شده است [۳]. به طور کلی، روش‌های موجود در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به سه روش شاخص هم‌پوشانی^۱ [۴]، روش‌های تحلیل آماری^۲ [۵]، روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری^۳ [۶] تقسیم می‌شوند. در پژوهش حاضر آسیب‌پذیری آبخوان شهرستان یاسوج در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از روش شاخص هم‌پوشانی و انتخاب مدل DRASTIC تعیین می‌شود. عبارت DRASTIC مخفف پارامترهایی است که در سیستم هیدروژئولوژیکی کنترل‌کننده آلودگی آب زیرزمینی وجود دارند و عبارت‌اند از: عمق آب زیرزمینی D، تغذیه خالص R، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان A، نوع خاک S، توپوگرافی T، اثر منطقه غیر اشباع I و هدایت هیدرولیکی آبخوان C [۴]. اگر چه این روش به طور

گسترده برای مناطق مختلف به کار برده می‌شود، اما باید براساس ویژگی‌های خاص هر منطقه و نوع آلاینده، برای هر منطقه اصلاح شود [۷-۹].

پژوهش‌های متعددی به طور گسترده برای اصلاح مدل DRASTIC در سرتاسر دنیا انجام شده است. وو و همکارانش (۲۰۱۸) در پژوهشی سعی در بهینه‌سازی پارامترهای شامل فاکتورهای طبیعی و فاکتورهای انسانی و همچنین اصلاح رتبه‌های این پارامترها بر مبنای شرایط محیطی منطقه در روش DRASTIC، در بیهای چین انجام دادند. در این پژوهش وزن هر پارامتر با استفاده از روش تحلیل عاملی AHP، برای کاهش تأثیر خطا در ارزیابی اعمال شد. نتایج وزن‌ها و رتبه‌های علمی DRASTIC اصلاح‌شده، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری برای آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی، ارائه داد. صحت‌سنجی مدل جدید دقت و کارآمدی آن را نسبت به مدل DRASTIC پایه برای این محدوده مطالعاتی، مناسب‌تر نشان داد. نشاط و همکارانش (۲۰۱۷) با اعمال روش تحلیل حساسیت، پارامترهای مدل DRASTIC برای آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی منطقه دشت کرمان را ارزیابی کردند. به علاوه، پتانسیل آسیب‌پذیری آلودگی با دقت بیشتری توسط بهینه‌سازی وزن‌های پارامترهای DRASTIC با روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری، ارزیابی شد. نتایج DRASTIC-SPSA و DRASTIC در مقایسه با غلظت نترات، نشان‌دهنده مطابقت بیشتر مدل اصلاح‌شده با واقعیت منطقه بود. به علاوه، نتایج شاخص DRASTIC-SPSA سازگاری بیشتری با غلظت نترات در مناطق شمالی، شمال غربی و جنوب غرب دشت داشت. همچنین، در پژوهشی دیگر جوادی و همکارانش (۲۰۱۷) با معرفی روش خوشه‌ای سعی در حذف برخی فردیت‌های مرتبط با روش هم‌پوشانی DRASTIC داشتند. در پژوهش یادشده نقشه آسیب‌پذیری تولیدشده، به وزن‌ها و درجات ثابت و مشخصی تکیه نمی‌کند و در نتیجه خصوصیات فیزیکی سیستم را بهتر نشان می‌دهد. این روش روی آبخوان قزوین انجام شد و فقط چهار فاکتور از هفت فاکتور DRASTIC برای تولید نتیجه بهتر به کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از همبستگی پیرسون برای صحت‌سنجی ارزیابی شد که بیان‌کننده بهبود نتایج روش پیشنهادی بود. در پژوهش حاضر نتایج به‌دست‌آمده از دو روش بر مبنای ریاضی (SPSA) و تصمیم‌گیری چندمعیاره

1. Overlay Index methods
2. Statistical Analysis Methods
3. Process Based Methods

دولومیتی، آهک مارونی، شیل، کنگلومرا و رسوبات واریزه‌های و آبرفتی متعلق به دوران چهارم زمین‌شناسی است. سازند آهکی منطقه با داشتن درز و شکاف نفوذپذیری زیادی دارد و می‌تواند سفره‌های مناسبی را در خود ایجاد کند. بررسی وضعیت جوی در یک دوره ۲۷ ساله آمار طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۲، متوسط دمای سالانه شهر یاسوج را ۱۵ درجه سانتی‌گراد گزارش داده است و نتایج به‌دست‌آمده از بررسی میزان بارش بیان می‌کند که معدل بارندگی سالیانه طی دوره آمار یادشده در یاسوج ۸۲۸ میلی‌متر است. یکی از رودخانه‌های مهم محدوده مطالعاتی رود بشار است. این رودخانه که از کوه‌های شرق یاسوج و کوه‌های اردکان فارس سرچشمه می‌گیرد، با گذر از جنوب شهر یاسوج به یکی از شاخه‌های مهم کارون به نام ماربر می‌پیوندد و رودخانه خرسان را تشکیل می‌دهند. همچنین، رودخانه بشار که از شمال شرق یاسوج و ارتفاعات دنا سرچشمه می‌گیرد، با عبور از مرکز شهر در ضلع جنوبی شهر یاسوج به رودخانه بشار می‌پیوندد. آب رودخانه‌های یادشده اغلب برای آبیاری زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شود. با وجود چشمه‌ها و رودخانه‌های فراوان در اطراف شهر یاسوج، به دلیل رشد جمعیت و توسعه شهری، این منابع بخش عمده‌ای از آب شرب شهر یاسوج و روستاهای حومه را تشکیل می‌دهند. محدوده مطالعاتی یاسوج از سه حوضه پایاب گرم‌رود، پایاب بشار و سراب بشار تشکیل شده است و آبخوان یاسوج با مساحت ۹۲ کیلومترمربع به عنوان مهم‌ترین آبخوان استان کهگیلویه و بویراحمد، بخشی از حوضه پایاب بشار است.

مواد و روش‌ها

شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC

روش DRASTIC که برای نخستین بار توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده^۱ در سال ۱۹۸۷ طراحی شد، یک سیستم استاندارد در ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی است [۴]. عبارت DRASTIC مخفف پارامترهایی است که در سیستم هیدروژئولوژیکی کنترل‌کننده آلودگی آب زیرزمینی هستند و عبارت‌اند از: عمق آب زیرزمینی D، تغذیه خالص R، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان A، نوع خاک S، توپوگرافی T، اثر منطقه غیر اشباع I و هدایت هیدرولیکی آبخوان C [۴].

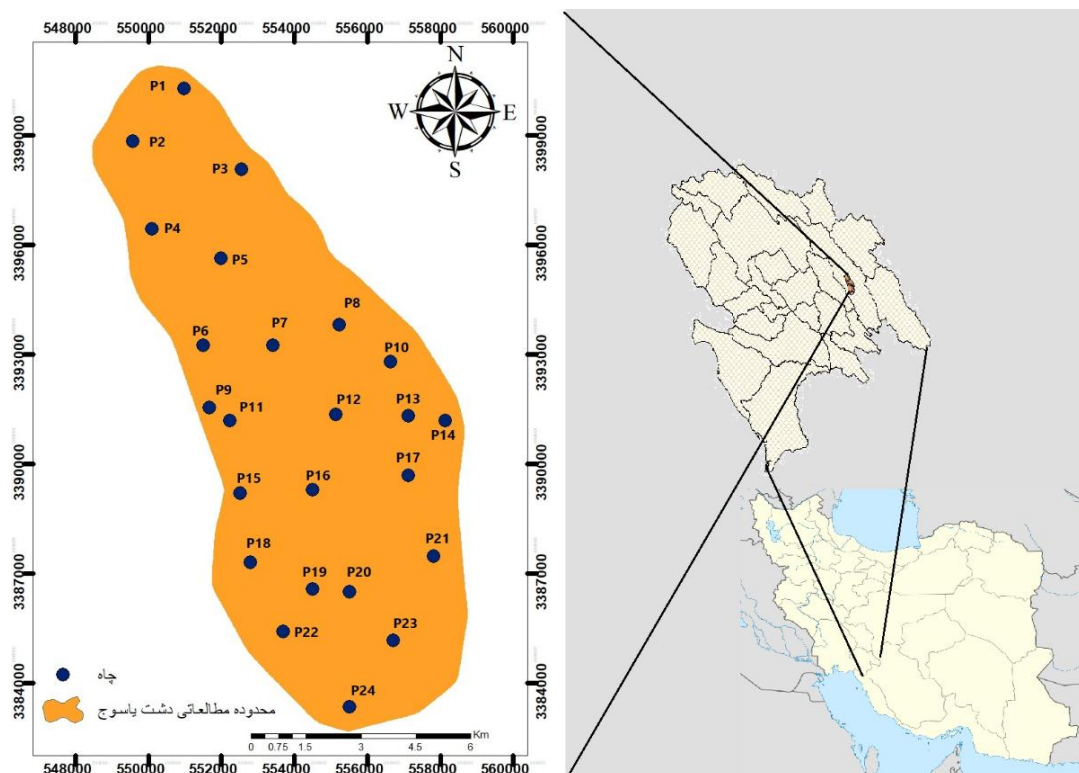
(AHP) روی مدل DRASTIC، برای نخستین بار در منطقه مطالعاتی یاسوج مطالعه و بررسی شد.

با کمک روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP برای اصلاح میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی مدل در انتقال آلودگی به آبخوان و همچنین روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA به منظور تعیین وزن مؤثر یا واقعی هر پارامتر در منطقه مطالعاتی، سعی در اصلاح مدل DRASTIC شده است. در نهایت، براساس میزان ضریب همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و غلظت نیترات آبخوان، نتایج به‌دست‌آمده از مدل DRASTIC و مدل‌های اصلاح‌شده DRASTIC-AHP و DRASTIC-SPSA واسنجی می‌شود. به این منظور، برای ایجاد رابطه همبستگی بین نتایج به‌دست‌آمده و آلاینده مد نظر در منطقه مطالعاتی، با توجه به موقعیت مکانی تعداد ۲۴ حلقه چاه مشاهده‌ای، نمونه‌های اندازه‌گیری شده آلاینده نیترات روی نقشه آسیب‌پذیری پخش می‌شود. نقشه‌های به‌دست‌آمده از تعیین آسیب‌پذیری پس از اجرا در نهایت می‌تواند با بررسی منابع آلاینده در سطح زمین برای تعیین حریم کیفی و ارزیابی خطر آلودگی منابع آب زیرزمینی استفاده شود. به این ترتیب که هر یک از نواحی یا حریم‌های کیفی، با توجه به وجود داشتن یا نداشتن منابع آلاینده، میزان خطرپذیری منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

منطقه مطالعاتی

شهر یاسوج، مرکز استان کهگیلویه و بویراحمد، با مساحت ۲۱۶۰ کیلومترمربع در موقعیت جغرافیایی ۳۰ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است (شکل ۱). ارتفاع متوسط شهر یاسوج از سطح دریا ۱۸۵۰ متر است. قسمت‌های شمال و شمال شرقی این شهر را رشته‌کوه‌های زاگرس فرا گرفته و کوه دنا با ارتفاع ۴۴۰۹ متر یکی از عارضه‌های مهم طبیعی در ارتفاعات شمال محدوده مطالعاتی است که به همراه ارتفاعاتی که در شرق، جنوب شرق قرار گرفته و توپوگرافی بسیار ناهموار، سرچشمه رودخانه‌ها و چشمه‌های پرآبی است که در دشت جریان دارند. قدیمی‌ترین تشکیلات زمین‌شناسی منطقه مربوط به کرتاسه بالایی و جدیدترین آن آبرفت‌های کواترنری است. جنس سازندهای محدوده مطالعه‌شده از سنگ آهک، دولومیت، آهک

1. United States Environmental Protection Agency USEPA



شکل ۱. محدوده مطالعاتی دشت یاسوج و مختصات مکانی چاه‌های کیفی

که در آن r درجه‌بندی و w وزن هر یک از پارامترهاست. با استفاده از نقشه‌های تهیه‌شده و به کمک وزن‌های در نظر گرفته‌شده مطابق جدول ۱، برای هر پارامتر در روش DRASTIC، نقشه آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی به دست می‌آید. عدد محاسبه‌شده نشان‌دهنده میزان حساسیت سفره به آلوده شدن است، به این ترتیب که اعداد بزرگ‌تر، تعیین‌کننده استعداد بیشتر سفره آب زیرزمینی برای آلوده شدن هستند.

جمع‌آوری داده‌های نیترات منطقه

محققان بسیاری با استفاده از رابطه همبستگی بین نتایج مدل آسیب‌پذیری DRASTIC و آلودگی نیترات موجود در منطقه و یا آلودگی‌های دیگر نظیر مواد شیمیایی فرار به اصلاح مدل موجود پرداختند [۹-۱۷]. برای به‌کارگیری غلظت یک آلودگی مانند نیترات به منظور صحت‌سنجی نقشه‌های آسیب‌پذیری، شرایط ویژه‌ای را باید در نظر گرفت [۱۵ و ۱۷]. این شرایط عبارت‌اند از: نیترات واردشده به آب‌های زیرزمینی باید از فعالیت‌های کشاورزی موجود در منطقه طی فعالیت حداقل ۲۰ سال باشد، حرکت به سمت آب‌های زیرزمینی داشته باشد، با بارش

در روش DRASTIC با تعیین عامل وزن و رتبه و نیز تعیین محدوده پارامترهای هفت‌گانه DRASTIC به ارزیابی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی از شاخص آسیب‌پذیری می‌پردازند. به این ترتیب که نسبت به اهمیت هر یک از پارامترهای هفت‌گانه DRASTIC در آسیب‌پذیری، وزنی برابر یک تا پنج به آنها اختصاص داده می‌شود. به مهم‌ترین آنها وزن پنج و به کم‌اهمیت‌ترینشان وزن یک داده شده است. محدوده پارامترها نیز برای هر پارامتر DRASTIC در محدوده‌های عددی بیشترین و کمترین و انواع محیط‌های مهم و مؤثر در حوضه مد نظر براساس اثر آنها بر پتانسیل آلودگی تعیین می‌شوند. رتبه‌بندی هر یک از این پارامترها براساس موقعیت پارامتر یادشده در این محدوده‌هاست. به هر یک از پارامترهای DRASTIC با توجه به موقعیت آنها در محدوده‌های یادشده ارزشی بین یک تا ۱۰ نسبت داده می‌شود. سرانجام، شاخص DRASTIC و یا به بیان دیگر، پتانسیل آلودگی (آسیب‌پذیری) در هر سلول یا چندضلعی موجود در نقشه به صورت رابطه ۱ تعیین می‌شود:

$$\text{DRASTIC} = \text{DrDw} + \text{RrRw} + \text{ArAw} + \text{SrSw} + \text{TrTw} + \text{IrIw} + \text{CrCw} \quad (1)$$

جدول ۱. محدوده رتبه ها و وزن های پیشنهادی الر و همکارانش (۱۹۸۷)

محیط خاک		تأثیر ناحیه غیر اشباع		محیط آبخوان		هدایت هیدرولیکی		توپوگرافی		تغذیه خالص		عمق آب	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
(متر)	(میلی متر)	(درصد شیب)	(متر/روز)	(درصد شیب)	(متر/روز)	(درصد شیب)	(متر/روز)	(درصد شیب)	(متر/روز)	(میلی متر)	(متر)	(متر)	(متر)
۱۰	نازک یا نبود لایه خاک	۱	لایه محبوس کننده	۲	شیل توده ای	۱	(۰/۴-۴/۱)	۱۰	(-۰.۲)	۱	(-۰.۵/۸)	۱۰	(-۰.۵/۱)
۱۰	شن	۳	سیلت/ رس	۳	آذرین / دگرگونی	۲	(۴/۱-۱۲/۳)	۹	(۲-۶)	۳	(۵۰/۸-۱۰۱/۶)	۹	(۱/۵-۴/۶)
۹	ماسه	۳	شیل	۴	آذرین / دگرگونی	۴	(۱۲/۳-۲۸/۷)	۵	(۶-۱۲)	۶	(۱۰۱/۶-۱۷۷/۸)	۷	(۴/۶-۹/۱)
۸	کود Peat گیاهی	۳	سنگ آهک	۶	هوازده	۶	(۱۲/۳-۴۱)	۳	(۱۲-۱۸)	۸	(۱۷۷/۸-۲۵۴)	۵	(۹/۱-۱۵/۲)
۷	رس فشرده / یا متراکم	۶	ماسه سنگ	۵	یخرفت ها	۸	(۴۱-۸۲)	۱	(>۱۸)	۹	(>۲۵۴)	۳	(۱۵/۲-۲۲/۸)
۶	لوم ماسه ای	۶	ماسه سنگ، سنگ آهک و شیل های لایه لایه	۶	ماسه سنگ لایه	۱۰	(>۸۲)					۲	(۲۲/۸-۳۰/۴)
۵	لوم				لایه، سنگ آهک و توالی							۱	(>۳۰/۴)
۴	لوم سیلنی	۶	شن و ماسه با مقدار زیادی رس و سیلت	۶	ماسه سنگ توده ای								
۳	لوم رس دار			۸	سنگ آهک توده ای								
۲	کود Muck	۸	شن و ماسه	۸	شن و ماسه								
۱	رس غیر متراکم	۹	بازالت	۹	بازالت								
		۱۰	سنگ آهک کارستی	۱۰	سنگ آهک کارستی								
۲: DRASTIC وزن	۵: DRASTIC وزن	۳: DRASTIC وزن	۱: DRASTIC وزن	۴: DRASTIC وزن	۵: DRASTIC وزن	۳: DRASTIC وزن	۱: DRASTIC وزن	۲: DRASTIC وزن	۵: DRASTIC وزن	۴: DRASTIC وزن	۱: DRASTIC وزن	۳: DRASTIC وزن	۵: DRASTIC وزن

به سطح بالاتر خود با انجام مقایسات زوجی تعیین می شود. ماتریس مقایسه زوجی، یک ماتریس $n \times n$ بوده و n تعداد عناصری است که مقایسه شده اند. ساعتی به منظور مقایسه زوجی معیارها، از اعداد یک تا n استفاده کرد که در آن عدد ۱ نشان دهنده اهمیت یکسان معیارها و عدد n نشان دهنده اهمیت درخور توجه معیار تحت بررسی نسبت به معیارهای دیگر است.

در روش تحلیل سلسله مراتبی AHP، پس از انجام مقایسات زوجی، وزن هر معیار محاسبه می شود. این وزن ها را وزن نسبی می گویند. برای هر ماتریس مقایسات زوجی حد قابل قبولی از میزان ناسازگاری با عنوان «میزان ناسازگاری» تعریف می شود (معادله ۲). ساعتی عدد $0/1$ را به عنوان حد قابل قبول ارائه کرده و معتقد است چنانچه میزان ناسازگاری بیشتر از $0/1$ باشد، بهتر است در قضاوت ها تجدید نظر شود [۱۲].

$$I.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

که در آن λ_{max} مقدار ویژه ماکزیمم و n مجموع مقادیر ویژه است. حاصل تقسیم شاخص ناسازگاری I.I. بر شاخص ناسازگاری تصادفی R.I.I.، میزان ناسازگاری I.R. نامیده می شود که معیار مناسبی برای قضاوت درباره ناسازگاری است (معادله ۳) [۱۲].

باران نیترات شسته شده به آب های زیرزمینی وارد شود و نسبتاً به طور یکنواخت در منطقه پخش شده باشد (آلاینده به صورت نقطه های پخش نشده باشد). از آنجا که اندازه گیری های نیترات منطقه به دلیل کاربری کشاورزی شامل موارد یاد شده می شود، شرایط لازم را برای صحت سنجی نقشه آسیب پذیری منطقه دارد. در پژوهش یاد شده به منظور تهیه داده های کیفی مورد نیاز، موقعیت چاه های منطقه با استفاده از دستگاه GPS ثبت شده و مطابق شکل ۱ روی نقشه آبخوان پراکنده شد. نمونه کیفی تعداد ۲۴ حلقه چاه، که معرف کل منطقه مطالعه شده بود، استفاده شد.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP

روش تحلیل سلسله مراتبی AHP، در سال ۱۹۸۰ توسط محقق به نام ساعتی^۱ استاد دانشگاه پیتسبورگ ارائه شده و از سوی محافل علمی استقبال شد. این روش با شناسایی نیروهای اثرگذار بر تصمیم گیری، تصمیم گیرنده را قادر می سازد تا تعامل بین معیارهای مختلف را در موقعیت های پیچیده و غیر ساختاری نمایان سازد. همچنین، در روش یاد شده می توان میزان سازگاری تصمیم را برآورد کرد. توماس ساعتی چهار اصل معکوسی، همگنی، وابستگی و انتظارها را به عنوان اصول فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP بیان کرد [۱۲]. با در نظر گرفتن اصول چهارگانه فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP، اولویت های بین عناصر هر سطح نسبت

2. Inconsistency Ratio

1. Thomas L.Saaty

آلاینده را در مناطق اشباع و غیر اشباع کنترل می‌کند [۱۶]. برای تهیه نقشه تغذیه خالص دشت، ابتدا تغذیه خالص‌های مربوط به ارتفاعات، بارندگی، رواناب و پساب که در زمینه بیلان به دست می‌آید، با هم جمع می‌شود [۱۶]. سپس، با توجه به نقشه هدایت هیدرولیکی دشت و مقدار نفوذپذیری آن، میزان تغذیه خالص تقسیم‌بندی می‌شود [۱۶]. نقشه تغذیه خالص به صورت رستری و اندازه ۱۰*۱۰ متر، تهیه شد و با توجه به رتبه‌های که در محاسبه شاخص آسیب‌پذیری برای این پارامتر در نظر گرفته شده است (جدول ۱)، نقشه رتبه‌بندی تغذیه در سه طبقه، تولید شد (شکل ۲-b). نتایج نشان داد بیشترین میزان تغذیه مربوط به نواحی غرب دشت یاسوج است.

محیط آبخوان

محیط آبخوان از نوع سنگ‌های یکپارچه و چه غیر یکپارچه و روان شدن آلودگی از مواد تشکیل‌دهنده آبخوان را نشان می‌دهد [۱۳]. در پژوهش حاضر از لوگ‌های حفاری چاه‌های اکتشافی به صورت نقطه‌ای برای تهیه نقشه خاک، منطقه غیراشباع و اشباع استفاده شده است، زیرا در ایران نقشه‌های پروفیل اعماق خاک به صورت نقشه تهیه نشده است. با استفاده از لوگ‌های حفاری موجود در محدوده مطالعاتی، همچنین نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس محیط آبخوان مشخص می‌شود [۱۲]. نقشه رتبه‌بندی محیط آبخوان به صورت رستری و اندازه سلول ۱۰*۱۰ متر، با توجه به جدول ۱ تهیه شد. قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی دشت، همچنین شمال تا نیمه غربی، بیشترین رتبه محیط آبخوان را به خود اختصاص داده است (شکل ۲-c). بیشترین میزان درصد شن و ماسه در بخش جنوبی و مرکزی آبخوان، بیشترین نفوذپذیری دارد.

محیط خاک

محیط خاک تأثیر بسیار مهمی در تغذیه‌ای دارد که به سطح ایستایی نفوذ می‌کند، و بر چگونگی حرکت آلوده‌کننده مؤثر است. هر چه ظرفیت حمل آلودگی بیشتر باشد، زمان طولانی‌تری برای حمل آن صرف می‌شود [۱۱]. برای تهیه نقشه محیط خاک از موقعیت چاه‌های حفاری، نوع و جنس خاک و ارزش مربوط به هر یک با توجه به جدول ۱، در محیط GIS استفاده شد. نقشه محیط خاک به صورت رستری و اندازه سلول ۱۰*۱۰ متر،

$$I.R = \frac{I.I}{R.I.I} \quad (3)$$

تحلیل حساسیت تک پارامتری SPSA

نیاز به تحلیل حساسیت در حوزه جغرافیا زمانی بیشتر است که بخواهیم بدانیم تا چه اندازه نابسامانی و خطاهای موجود در پارامترهای ورودی، تحلیل‌های جغرافیایی نقشه‌های خروجی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۰]. در مدل‌سازی GIS، اثر داده‌های ورودی به صورت منفرد، روی نقشه هم‌پوشانی نهایی بررسی می‌شود [۲۱]. میزان حساسیت تک پارامتری برای ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترهای DRASTIC روی شاخص آسیب‌پذیری طراحی شده است. در این روش تحلیل، وزن مؤثر یا واقعی هر پارامتر ورودی در هر پلیگون با وزن تئوریک اختصاص یافته توسط مدل تحلیلی مقایسه می‌شود. وزن مؤثر هر پلیگون با استفاده از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$W = ((P_r \times P_w) \div V) \times 100 \quad (4)$$

که در این رابطه W وزن مؤثر هر پارامتر، P_r و P_w به ترتیب مقدار رتبه و وزن هر پارامتر و V شاخص کلی آسیب‌پذیری است [۱۴].

یافته‌ها

تهیه نقشه‌های معیار مدل DRASTIC

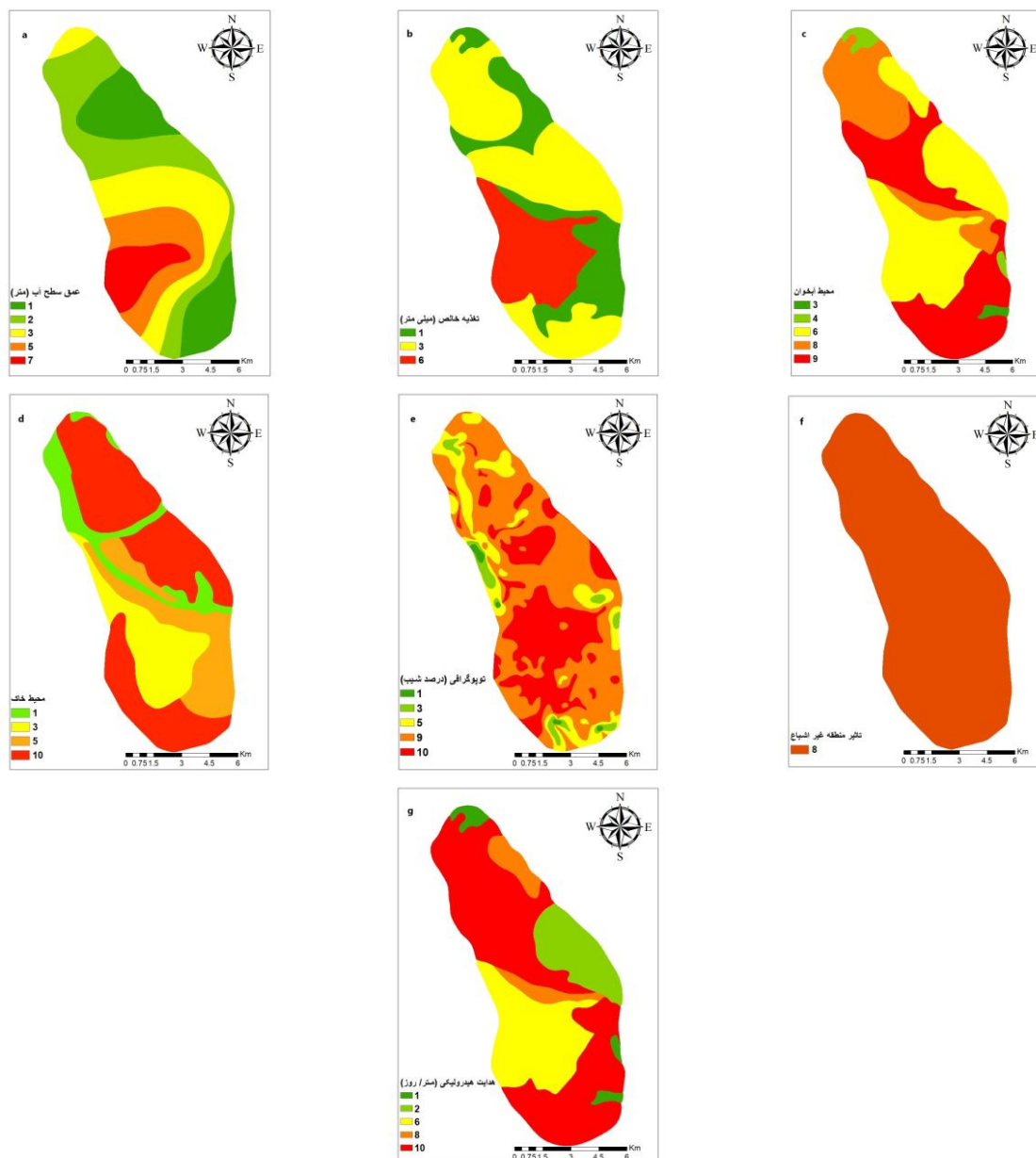
عمق آب زیرزمینی

معمولاً ظرفیت میرایی با افزایش عمق تا سطح ایستایی افزایش می‌یابد، چرا که هر چقدر سطح آب عمیق‌تر باشد، موجب می‌شود زمان حرکت و ماندگاری آلوده‌کننده افزایش یابد [۴]. با استفاده از آمار و اطلاعات تعداد ۲۴ چاه مشاهده‌ای، میانگین عمق آب زیرزمینی تهیه و سپس با بهره‌گیری از قابلیت توزیع مکانی در نرم‌افزار GIS و به روش درون‌یابی کریجینگ^۱ نقشه رستری هم‌عمق آب زیرزمینی، در اندازه سلول ۱۰*۱۰ متر، تهیه شد. سپس، با استفاده از قابلیت طبقه‌بندی بر مبنای جدول ۱، نقشه رتبه‌بندی عمق در پنج کلاس، تهیه شد (شکل ۲-a). همان‌طور که مشاهده می‌شود در قسمت غرب و جنوب غرب سطح آب زیرزمینی عمق کمتری دارد و در مدل DRASTIC بیشترین رتبه را به خود اختصاص می‌دهد.

تغذیه خالص

این شاخص مقدار آب موجود برای انتشار و رقیق‌سازی

1. Kriging



شکل ۲. نقشه‌های معیار هفت پارامتر DRASTIC

استفاده شد. این لایه با توجه به رتبه‌های جدول ۱، در پنج سطح، طبقه‌بندی شد [۴] (شکل e-۲). با توجه به نقشه به‌دست‌آمده، درصد ناچیزی از منطقه شیب بیش از ۶ درصد دارد.

تأثیر منطقه غیر اشباع

با استفاده از لوگ‌های حفاری چاه‌ها و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس خاک منطقه غیر اشباع مشخص می‌شود [۱۵]. برای تهیه نقشه منطقه غیر اشباع با توجه به جدول ۱ منطقه رتبه‌بندی شده و در نهایت نقشه

تهیه شد. با توجه به نقشه تولیدشده (شکل d-۲)، جنس خاک در بخش جنوب، شمال و نیمه شرقی دشت یاسوج از شن و رس غیر متراکم و قسمت مرکزی و غرب دشت از لوم و ترکیبی از رس است.

توپوگرافی

درصد شیب با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع محاسبه شد. برای تهیه نقشه شیب از نقشه رقومی توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ استفاده شد. سپس، در محیط ArcGIS، از ابزار تحلیل فضایی برای تولید لایه شیب

روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP

به منظور تصحیح وزن پارامترهای به‌کاررفته در مدل DRASTIC به روش AHP، وزن‌دهی بر پایه قضاوت کارشناسی انجام شد. ابتدا هفت پارامتر موجود در مدل براساس اهمیت و کارکردی که در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان منطقه داشتند، اولویت‌بندی شدند. به دلیل خصوصیات خاص توپوگرافی منطقه کم‌تأثیرترین پارامتر شیب عنوان شد و از طرفی پارامتر تغذیه آبخوان بنا بر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی حاکم بر منطقه، مؤثرترین پارامتر از بین پارامترهای مدل برشمرده شد. در محیط نرم‌افزار Expert Choice، هفت پارامتر موجود در مدل DRASTIC براساس اهمیت و نقشی که در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان منطقه دشت یاسوج داشتند، بر پایه قضاوت کارشناسی، به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه شده و اهمیت آنها نسبت به یکدیگر با در نظر گرفتن مقادیر پیشنهادی ساعتی، تعیین شد. با توجه به میزان ناسازگاری $IR = 0/04$ ، مقبولیت تصمیم‌گیری‌ها روشن است. در نهایت، خروجی نرم‌افزار که در واقع وزن‌های جدید معیارها هستند، برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری دشت مطالعه‌شده، استفاده شد. وزن‌های جدید در محیط نرم‌افزار ArcGIS با ابزار Raster Calculator روی نقشه‌های معیار اعمال شدند. نقشه به‌دست‌آمده با عنوان DRASTIC-AHP در شکل ۳-b نشان داده شده است.

روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA

با به‌کارگیری این روش وزن مؤثر هر پارامتر مشخص می‌شود. تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA مطابق با معادله ۴، روی داده‌های مربوط به هفت پارامتر DRASTIC، اعمال می‌شود. وزن‌های مؤثر به‌دست‌آمده نسبت به وزن‌های تئوری متفاوت است. بیشترین وزن مؤثر مربوط به پارامتر منطقه غیراشباع با مقدار ۳۱ درصد و کمترین وزن مؤثر به لایه توپوگرافی با وزن مؤثر ۶ درصد اختصاص یافت. این نتیجه با مقادیر در نظر گرفته‌شده تئوری DRASTIC پایه، هم‌خوانی دارد. اما پارامترهای تغذیه آبخوان و محیط خاک با وزن مؤثر مساوی و برابر ۸ درصد ظاهر شده‌اند، که این مطلب نشان‌دهنده کاهش وزن مؤثر تغذیه آبخوان نسبت به محیط خاک، در مقایسه با وزن‌های تئوری DRASTIC پایه، است. پارامتر محیط آبخوان، هدایت هیدرولیکی و عمق آب

مربوط به منطقه غیر اشباع به صورت رستری و اندازه سلول 10×10 متر، تهیه شد (شکل ۲-f). با توجه به نقشه به‌دست‌آمده واضح است که منطقه غیر اشباع ناحیه مطالعاتی در تمامی نواحی از جنس شن و ماسه است و رتبه هشت دارد.

هدایت هیدرولیکی

برای تولید نقشه‌های مربوط به توزیع هدایت هیدرولیکی از نتایج مربوط به آزمایش‌های پمپ و سنگ استفاده می‌شود [۱۷]. در تولید لایه هدایت هیدرولیکی با توجه به آنکه در آزمایش‌های پمپاژ، مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال آب اندازه‌گیری می‌شود، با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب ضخامت اشباع آبخوان به دست می‌آید [۱۱] این نقشه با توجه به تقسیم‌بندی پارامتر هدایت هیدرولیکی (جدول ۱)، به پنج کلاس تقسیم‌بندی شد (شکل ۲-g).

تلفیق لایه‌ها و تولید نقشه آسیب‌پذیری ذاتی سفره آب

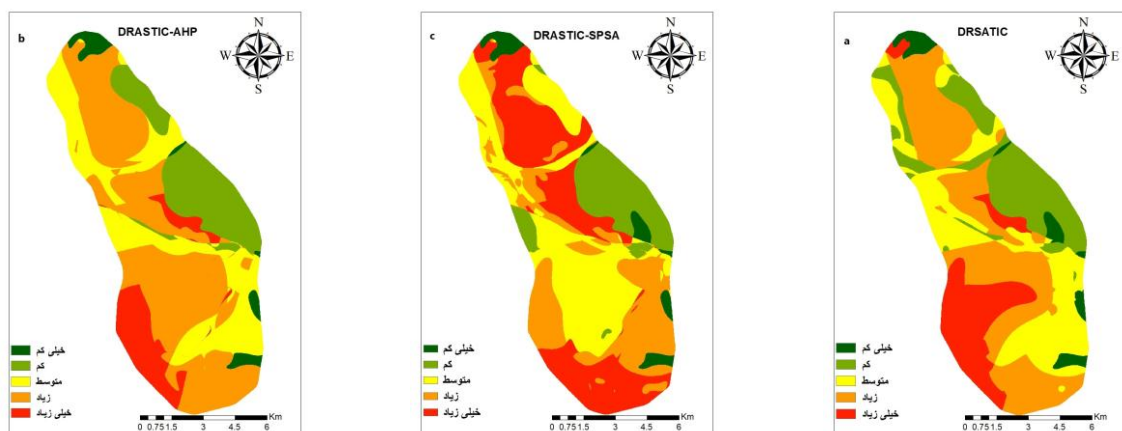
زیرزمینی DRASTIC دشت یاسوج

در محدوده مطالعاتی دشت یاسوج، وزن‌دهی پارامترها بر اساس روش پیشنهادی توسط الر و همکارانش (۱۹۸۷)، انجام شد. با استفاده از نقشه‌های رتبه‌بندی پارامترهای هفتگانه DRASTIC (شکل ۲) و وزن اصلی هر یک از پارامترها (جدول ۱)، نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت یاسوج طبق معادله ۱، در محیط ArcGIS، با استفاده از ابزار Raster Calculator تهیه شد (شکل ۳). با توجه به شکل ۳-a، منطقه مطالعه‌شده به پنج کلاس به‌ترتیب با استعداد خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد برای آسیب‌پذیری، تقسیم شد. مناطق با استعداد آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد، در قسمت‌های شمالی، میانی، جنوب و جنوب غربی گسترده شده است. در این مرحله اطلاعات نقشه شاخص DRASTIC با مقادیر نیترا در موقعیت‌های ثبت‌شده برازش داده شد. پس از محاسبه همبستگی ملاحظه می‌شود که فقط ۵۵ درصد همبستگی بین نقشه آسیب‌پذیری آبخوان و داده‌های نیترا برقرار است که این مقدار نشان‌دهنده ضعف نسبی این روش در برابر ویژگی‌های متفاوت هیدروژئولوژیکی منطقه دشت یاسوج در ارتباط با انتقال آلودگی است.

اصلاح‌شده، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری برای آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی، ارائه داد. صحت‌سنجی مدل جدید دقت و کارآمدی آن را نسبت به مدل DRASTIC پایه برای این محدوده مطالعاتی، مناسب‌تر نشان داد. نشاط و همکارانش (۲۰۱۷) با اعمال روش تحلیل حساسیت به ارزیابی پارامترهای مدل DRASTIC برای آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی منطقه دشت کرمان پرداختند. به علاوه، پتانسیل آسیب‌پذیری آلودگی با دقت بیشتری توسط بهینه‌سازی وزن‌های پارامترهای DRASTIC با روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری، ارزیابی شد. نتایج DRASTIC-SPSA و DRASTIC در مقایسه با غلظت نیترات، نشان‌دهنده مطابقت بیشتر مدل اصلاح‌شده با واقعیت منطقه بود. به علاوه، نتایج شاخص DRASTIC-SPSA سازگاری بیشتری با غلظت نیترات در مناطق شمالی، شمال غربی و جنوب غرب دشت داشت. همچنین، در پژوهشی دیگر جوادی و همکارانش (۲۰۱۷) با معرفی روش خوشه‌ای سعی در حذف برخی فردیت‌های مرتبط با روش هم‌پوشانی DRASTIC داشتند. در پژوهش حاضر نقشه آسیب‌پذیری تولیدشده، به وزن‌ها و درجات ثابت و مشخصی تکیه نمی‌کند و در نتیجه خصوصیات فیزیکی سیستم را بهتر نشان می‌دهد. این روش روی آبخوان قزوین اعمال شده و فقط چهار فاکتور از هفت فاکتور DRASTIC برای تولید نتیجه بهتر به کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از همبستگی پیرسون برای صحت‌سنجی ارزیابی شد که بیان‌کننده بهبود نتایج روش پیشنهادی بود.

به ترتیب با مقادیر ۱۸، ۱۹ و ۱۰ درصد در رتبه‌های بعد از منطقه اشباع قرار گرفته‌اند. در مقایسه با وزن‌های تئوری DRASTIC، کاهش چشمگیر وزن مؤثر پارامتر عمق آب درخور توجه است. همچنین، پارامتر هدایت هیدرولیکی که در مقایسه با محیط آبخوان، وزن مساوی داشت، پس از انجام تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA با وزن مؤثر بیشتر ظاهر شد. در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترکیب لایه‌های مربوط به هفت پارامتر بر مبنای وزن‌های اصلاح‌شده به روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA انجام شد. نقشه به‌دست‌آمده با عنوان DRASTIC-SPSA نشان داده شده است. پس از صحت‌سنجی به روش ضریب همبستگی پیرسون، بین داده‌های نیترات منطقه و نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA افزایش حدود ۱۴ درصد تطابق نتایج با داده‌های واقعی نیترات منطقه، قابل مشاهده است. این در حالی است که نتایج پژوهش‌های دیگری که در مناطق مختلف دنیا بر اساس مدل اصلاح‌شده DRASTIC انجام شده است، نشان‌دهنده ارزیابی واقع‌بینانه‌تری با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه از حساسیت آسیب‌پذیری آب زیرزمینی است [۳، ۷، ۹، ۱۱-۱۷].

در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر در زمینه بهبود ارزیابی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی، استفاده از روش‌های مبتنی بر ریاضی، آمار و احتمال توصیه می‌شود. چنانچه وو و همکارانش (۲۰۱۸) توانستند با اصلاح مدل DRASTIC و با استفاده از روش تحلیل عاملی AHP، تأثیر خطا در ارزیابی را کاهش دهند. نتایج وزن‌ها و رتبه‌های علمی DRASTIC

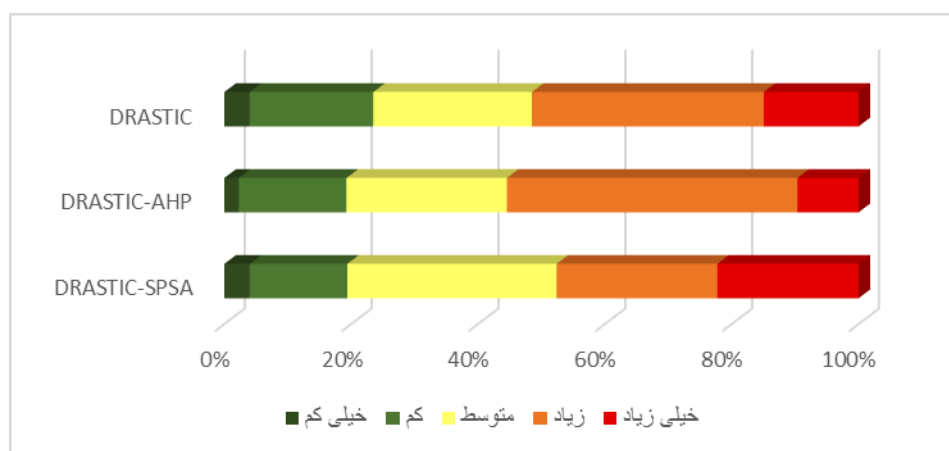


شکل ۳. نقشه‌های به‌دست‌آمده از سه روش DRASTIC، DRASTIC-AHP و DRASTIC-SPSA

بحث و نتیجه‌گیری

پارامتر تغذیه خالص آبخوان اهمیت بیشتری نسبت به دیگر پارامترها داشت. در ادامه، پارامترهای عمق آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی، تأثیر منطقه غیر اشباع و محیط آبخوان به ترتیب اهمیت بیشتری دارند. پارامترهای محیط خاک و شیب توپوگرافی در رده آخر از نظر اهمیت، شناخته شدند. با اعمال این روش نیز نتایج تا ۴ درصد با توجه به ضریب همبستگی ($R=0/59$) بهبود یافته است. روش DRASTIC-AHP مناطق با آسیب‌پذیری خیلی زیاد را در همان محدوده‌های جغرافیایی اما در وسعت کمتر نشان داده است (شکل ۴). در ضمن، از وسعت مناطق با آسیب‌پذیری کم در شمال غربی دشت نیز کاسته شده است (شکل ۳). در نهایت، از مقایسه روش AHP با دو روش دیگر می‌توان به این نتیجه رسید که قضاوت‌های کارشناسی در مقایسه با روش SPSA، اعتبار بسیار کمتری برای اصلاح مدل DRASTIC در منطقه دشت یاسوج دارد. درصد مناطق با آسیب‌پذیری کم و خیلی کم در روش DRASTIC در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی‌شده از روش‌های اصلاحی، قابل تأمل است (شکل ۴). نتایج روش‌های اصلاحی روی روش DRASTIC آن دسته از مناطق مستعد آسیب‌پذیری را که از نظر دور مانده بود، به خوبی مشخص می‌کند. در نهایت، روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA توانست بهترین پیش‌بینی را با توجه به بیشترین ضریب همبستگی در مقایسه با دیگر روش‌ها و طبقه‌بندی مناسب‌تر، با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی خاص منطقه، نتیجه دهد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از ضریب همبستگی بین نیترا ت اندازه‌گیری‌شده در منطقه مطالعاتی و نقشه آسیب‌پذیری مدل DRASTIC ($R=0/55$)، ارزیابی دقیق‌تر پتانسیل آلودگی در منطقه مطالعه‌شده با دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP و تحلیل حساسیت تک‌پارامتری SPSA به منظور بیشتر کردن دقت پیش‌بینی آسیب‌پذیری آبخوان محدوده دشت یاسوج انجام شد. مقایسه نتایج سه روش DRASTIC، DRASTIC-SPSA و DRASTIC-AHP در شکل ۴، آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از روش SPSA در مقایسه با روش DRASTIC از نظر تخصیص بیشترین مقدار وزن مؤثر به پارامتر تأثیر منطقه غیر اشباع و کمترین مقدار وزن مؤثر به پارامتر شیب توپوگرافی، با وزن‌های نسبت داده‌شده در روش DRASTIC اولیه مشابهت دارد. پس از اعمال وزن‌های جدید، بهبود تطابق نتایج به‌دست‌آمده از روش DRASTIC اصلاح‌شده به روش SPSA، با ضریب همبستگی ($R=0/69$) به اندازه تقریبی ۱۴ درصد قابل مشاهده است. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده بخش وسیعی از مناطق شمالی، مرکزی و جنوبی دشت یاسوج بسیار آسیب‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. بیشترین همبستگی موجود بین نتایج به‌دست‌آمده از روش DRASTIC و DRASTIC-SPSA درباره مناطق با آسیب‌پذیری بسیار کم، کم و متوسط است (شکل ۳). در روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP که برگرفته از نظرات کارشناسی است،



شکل ۴. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از سه روش DRASTIC، DRASTIC-AHP و DRASTIC-SPSA

- Science of the total environment. 2009 Dec 20;408(2):245-54.
- [7]. Xiaoyu WU, Bin LI, Chuanming MA. Assessment of groundwater vulnerability by applying the modified DRASTIC model in Beihai City, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018 Feb 21;1-5.
- [8]. Mondal I, Bandyopadhyay J, Chowdhury P. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in Jangalmahal area, West Bengal, India. *Sustainable Water Resources Management*. 2018:1-7.
- [9]. Neshat A, Pradhan B. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017 Nov 1;10(22):501.
- [10]. Allouche N, Maanan M, Gontara M, Rollo N, Jmal I, Bouri S. A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environmental Modelling & Software*. 2017 Feb 1;88:168-82.
- [11]. Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S, Moghaddam AA. Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM). *Science of the Total Environment*. 2017 Jan 1;574:691-706.
- [12]. Neshat A, Pradhan B. An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater vulnerability assessment. *Natural Hazards*. 2015 Mar 1;76(1):543-63.
- [13]. Neshat A, Pradhan B, Javadi S. Risk assessment of groundwater pollution using Monte Carlo approach in an agricultural region: an example from Kerman Plain, Iran. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2015 Mar 1;50:66-73.
- [14]. Neshat A, Pradhan B, Shafri HZ. An integrated GIS based statistical model to compute groundwater vulnerability index for decision maker in agricultural area. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2014 Dec 1;42(4):777-88.
- [15]. Neshat A, Pradhan B, Pirasteh S, Shafri HZ. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2014 Apr 1;71(7):3119-31
- [16]. Neshat A, Pradhan B. Risk assessment of groundwater pollution with a new methodological framework: application of Dempster-Shafer theory and GIS. *Natural Hazards*. 2015 Sep 1;78(3):1565-85
- ترکیب GIS با روش‌های مبتنی بر علم ریاضی و تصمیم‌گیری چندمعیاره که در پژوهش حاضر به آن پرداخته شده است، به‌ویژه درباره پارامترهای هیدروژئولوژی که از عدم قطعیت برخوردارند، بسیار مفید است. رتبه‌بندی‌های پارامترهای مدل DRASTIC، اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده از هر روش به هر پارامتر و در نهایت تلفیق نقشه‌های معیار همگی با توجه به قابلیت‌های این نرم‌افزار پر قدرت به تولید نقشه‌های مطلوب از سراسر منطقه مطالعاتی منجر شد.
- با توجه به نقشه آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده، حریم کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه دشت یاسوج در مقابل آلاینده نیترات قابل ارزیابی است که به موجب آن، محدودیت‌ها و تغییرات خاص فعالیت‌های انسانی باید برای محدوده‌های با آسیب‌پذیری خیلی زیاد و زیاد در دستور کار قرار گیرد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند در بخش مدیریت منابع آب استفاده شود. انجام نمونه‌برداری از غلظت نیترات برای صحت‌سنجی مدل، بهتر است در مقیاس وسیع‌تری صورت پذیرد.

منابع

- [1]. Manap MA, Sulaiman WN, Ramli MF, Pradhan B, Surip N. A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*. 2013, May 1;6(5):1621-37.
- [2]. "Report of Quality Policy Guide," the Ministry of Energy, 1392.
- [3]. Javadi S, Kavehkar N, Mohammadi K, Khodadadi A, Kahawita R. Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International*. 2011 Oct 1;36(6):719-32.
- [4]. Aller L, Lehr JH, Petty R, Bennett T. DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America. 1987.
- [5]. Masetti M, Sterlacchini S, Ballabio C, Sorichetta A, Poli S. Influence of threshold value in the use of statistical methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of the total environment*. 2009 Jun 1;407(12):3836-46.
- [6]. Neukum C, Azzam R. Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations.

- [17]. Neshat A, Pradhan B, Dadras M. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Resources, Conservation and Recycling*. 2014 May 1;86:74-86
- [18]. Sinha MK, Verma MK, Ahmad I, Baier K, Jha R, Azzam R. Assessment of groundwater vulnerability using modified DRASTIC model in Kharun Basin, Chhattisgarh, India. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016 Feb. 1;9(2):98.
- [19]. Ribeiro L, Pindo JC, Dominguez-Granda L. Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of The Total Environment*. 2017 Jan 1;574:1674-83.
- [20]. Lodwick WA, Monson W, Svoboda L. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: suitability analysis. *International Journal of Geographical Information System*. 1990 Oct 1;4(4):413-28.