

## شناسایی مناطق مستعد آلودگی آبخوان دشت ملکان با استفاده از روش‌های فازی

حسین نوروزی قوشبلاغ<sup>۱\*</sup>، عطاالله ندیری<sup>۲</sup>، اصغر اصغری مقدم<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

Nadiri@tabrizu.ac.ir

۲. دانشیار، هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

Moghaddam@tabrizu.ac.ir

۳. استاد، هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۸

### چکیده

عدم شناخت صحیح مناطق مستعد آلودگی در آبخوان‌ها ممکن است سبب ایجاد آلودگی‌های شدید در منابع آب زیرزمینی شود و چه‌بسا اتفاق می‌افتد که دیگر نتوان از این منابع استفاده کرد. منابع آب زیرزمینی در منطقه ملکان به دلیل وجود باغ‌های انگور و کشاورزی شدید، تحت تأثیر شیرابه حاصل از مواد نیتراته هستند، از این رو شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان این منطقه با روش مناسب، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق از روش‌های دراستیک بهینه‌شده با منطق فازی و تئوری کاتاستروف، برای بررسی مناطق مستعد آلودگی آبخوان آزاد دشت ملکان استفاده شد. برای بهینه‌سازی، پارامترهای روش دراستیک که شامل هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی است، ورودی مدل و مقدار شاخص آسیب‌پذیری، خروجی مدل‌ها تعریف شد. صحت‌سنجی روش‌ها نیز با استفاده از داده‌های غلظت نیترات و ضریب همبستگی با شاخص آسیب‌پذیری در منطقه انجام شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که روش دراستیک تصحیح‌شده با استفاده از تئوری کاتاستروف با شاخص همبستگی بالا با نیترات، نتیجه بهتری را نسبت به منطق فازی برای آبخوان ارائه داده است. بر اساس نتایج روش کاتاستروف، ۵۶، ۲۳، ۲۱ درصد از منطقه به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد واقع شده‌اند و بخش‌های مرکزی دشت، به‌عنوان مناطق آسیب‌پذیر شناخته می‌شوند.

### کلیدواژه

آبخوان، آسیب‌پذیری، تئوری کاتاستروف، دشت ملکان، منطق فازی.

### ۱. سرآغاز

آسیب‌پذیری آبخوان دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. مفهوم آسیب‌پذیری برای نخستین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه برای آگاهی بخشی درباره آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است (Vrba et al., 1994). آسیب‌پذیری، ویژگی ذاتی آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود که پتانسیل آبخوان را برای نفوذ و انتشار آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد (Babiker et al., 2005). آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos et al., 2007). ارزیابی

سیستم آب زیرزمینی نسبت به آلودگی‌ها پاسخ سریعی نمی‌دهد و زمان رسیدن آلودگی‌ها به محدوده آب زیرزمینی و انتشار آن در آبخوان معمولاً طولانی است. برای پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی آلوده و مصرف مجدد آن، اغلب باید وقت و هزینه بسیاری صرف شود و یافتن منبع آبی جایگزین همیشه امکان‌پذیر نیست. بنابراین، بهترین و مؤثرترین راه‌حل، جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به این منبع با ارزش است. تعیین میزان آلودگی آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین مطالعات هیدروژئولوژیکی است که در این ارتباط شناخت مناطق مستعد آلودگی و بررسی

مختلف بدون هیچ تغییری استفاده می‌شود، می‌تواند آثار نوع و ویژگی‌های آلودگی را در نظر نگیرد. بنابراین، این روش باید برای آبخوان و آلودگی خاص، کالیبراسیون و تصحیح شود. مدل دراستیک با روش‌های متعددی مانند شبکه عصبی مصنوعی و تئوری کاتاسترف (Sadghfam et al., 2016; Baghapour et al., 2016) بهبود یافته است. Dixon (۲۰۰۵) با استفاده از منطق فازی، پارامترهای روش دراستیک را برای آبخوان آرکانزاس بررسی و نتایج را با روش دراستیک معمولی مقایسه کرد. اصغری مقدم و همکاران (۱۳۹۲) آسیب‌پذیری آبخوان دشت مراغه- بناب را با استفاده از روش‌های مختلف بررسی کردند و نتایج این تحقیق نشان داد که روش نروفازی روشی دقیق برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان است. همچنین روش کاتاستروف نیز توانایی کاربرد در مسائل منابع آب و آسیب‌پذیری را دارا بوده و می‌تواند به‌عنوان روشی کارا در این بحث استفاده شود (Sadghfam et al., 2016). کاتاستروف<sup>۳</sup> یک نظریه ریاضی است که مکانیزم‌های تغییرات ناگهانی و ناپیوسته وضعیتی را در انواع مختلف پدیده‌ها شبیه‌سازی می‌کند. تئوری کاتاستروف مدلی برای فرایند تغییرات سازمان‌دهی شده است، به‌طوری‌که اگر بخواهیم از تغییرات ناگهانی دوری کنیم باید از قبل تغییرات تدریجی و پیوسته را مدیریت کرده تا بتوان استراتژی‌هایی برای رسیدن به حالت آتی مورد نظر، تدوین کرد. در این تحقیق سعی شده است که از روش کاتاستروف برای بهبود نتایج دراستیک با استفاده از چارچوبی هیدروژئولوژیکی استفاده شود.

محدوده مطالعاتی ملکات یکی از قطب‌های تولید انگور کشور است، از این رو به دلیل استفاده بیش از اندازه از کودهای شیمیایی و حیوانی می‌تواند جزء دشت‌های آلوده به نترات باشد. با توجه به اهمیت آب زیرزمینی در منطقه ملکات که برای آشامیدن نیز استفاده می‌شود، در مطالعه حاضر، شناسایی مناطق دارای پتانسیل آلودگی با استفاده از روش آسیب‌پذیری تئوری کاتاستروف و منطق فازی

آسیب‌پذیری برای تعیین آلودگی آب‌های زیرزمینی بخشی از مدیریت آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان به‌شمار می‌رود. با شناسایی مناطقی که استعداد آلودگی در آن قوی است می‌توان منطقه را از لحاظ آسیب‌پذیری پهنه‌بندی کرد و در نتیجه با اعمال تمهیدات لازم از آلوده شدن مناطق با پتانسیل آسیب‌پذیری بالا جلوگیری کرد. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی بر این اساس است که در برخی اراضی، پتانسیل آسیب‌پذیری نسبت به آلودگی بیش‌تر از دیگر اراضی است (Piscopo, 2001). تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد. این سه دسته عبارت‌اند از: رتبه‌دهی توصیفی، آماری و تحلیلی و روش ترکیبی (Niknam et al., 2007). یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان روش دراستیک است که پرکاربردترین روش از مدل‌های PCSM<sup>۱</sup> است که در این مدل‌ها علاوه بر طبقه‌بندی پارامترهای مختلف، ضرایب وزنی نسبی برای هر عامل تعیین می‌شود. این روش‌ها بر پایه تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده‌اند و اساس کار یکسانی دارند و همچنین بر ارزیابی توصیفی و کمی آسیب‌پذیری تکیه دارند. روش‌های PCSM در به‌کارگیری نوع و تعداد پارامترها باهم تفاوت داشته ولی درنهایت به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی می‌انجامند. روش دراستیک توسط انجمن ملی آب زیرزمینی (NGWA<sup>۲</sup>) با همکاری آژانس حفاظت محیطی ایالت متحده (USEPA) ایجاد شده است (Aller et al., 1987). تاکنون مطالعات زیادی در زمینه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش دراستیک انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کاکامیگهارا در مرکز ژاپن (Babiker et al., 2005) اشاره کرد. همچنین در کره جنوبی از مدل دراستیک برای ارزیابی محل مناسب دفع زباله‌ها و جلوگیری از آلوده شده آب‌های زیرزمینی استفاده شده است (Lee, 2003). از آنجا که این روش در مکان‌های

زهکش‌های سطحی دشت ملکان هستند که منابع آب سطحی این رودخانه‌ها پس از عبور از دشت ملکان و بعد با فاصله کمتری به دریاچه ارومیه می‌ریزند. براساس آمار ایستگاه‌های هیدرومتری، بیشترین دبی لیلان‌چای در فروردین‌ماه و تقریباً برابر با  $4/8$  مترمکعب بر ثانیه و بیشترین دبی مردق‌چای در اردیبهشت‌ماه و برابر با  $8/1$  مترمکعب بر ثانیه است (نوروزی، ۱۳۹۴).

آبخوان دشت از نوع آزاد است که اکثراً از پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، پادگانه‌های آبرفتی جدید، مخروط افکنه‌ها و رسوبات رودخانه‌ای تشکیل یافته است و مواد اصلی تشکیل‌دهنده آبخوان رسوبات ماسه، سیلت و رس است. بر اساس نقشه‌های هم‌ضخامت رسوبات آبرفتی، لاگ‌های حفاری و داده‌های ژئوفیزیکی، در قسمت‌های بالایی دشت، ذرات تشکیل‌دهنده سفره دانه‌درشت بوده و هر چه به سمت مرکز دشت و نواحی خروجی و به سمت دریاچه ارومیه نزدیک می‌شویم رسوبات دانه‌ریزتر هستند و هدایت هیدرولیکی کمتری دارند. محاسبات بیلان آب زیرزمینی برای سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ حاکی از این است که در محدوده سال مذکور، تخلیه از آن به میزان  $5/23$  میلیون مترمکعب بیشتر از میزان تغذیه است. با توجه به هیدروگراف واحد دشت ملکان، سطح آب زیرزمینی در طول سال بیلان،  $0/44$  متر افت داشته است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵).

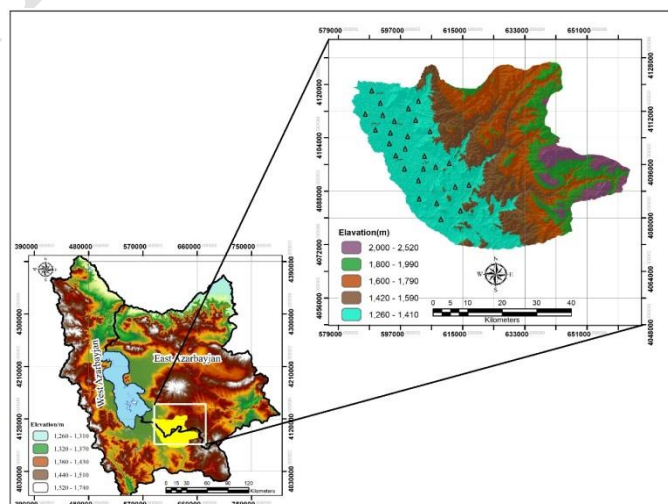
بررسی شده است که می‌تواند در سطح مدیریتی کمکی برای کنترل آلاینده‌های منابع آبی این منطقه باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، هیدروژئولوژیکی،

#### زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه

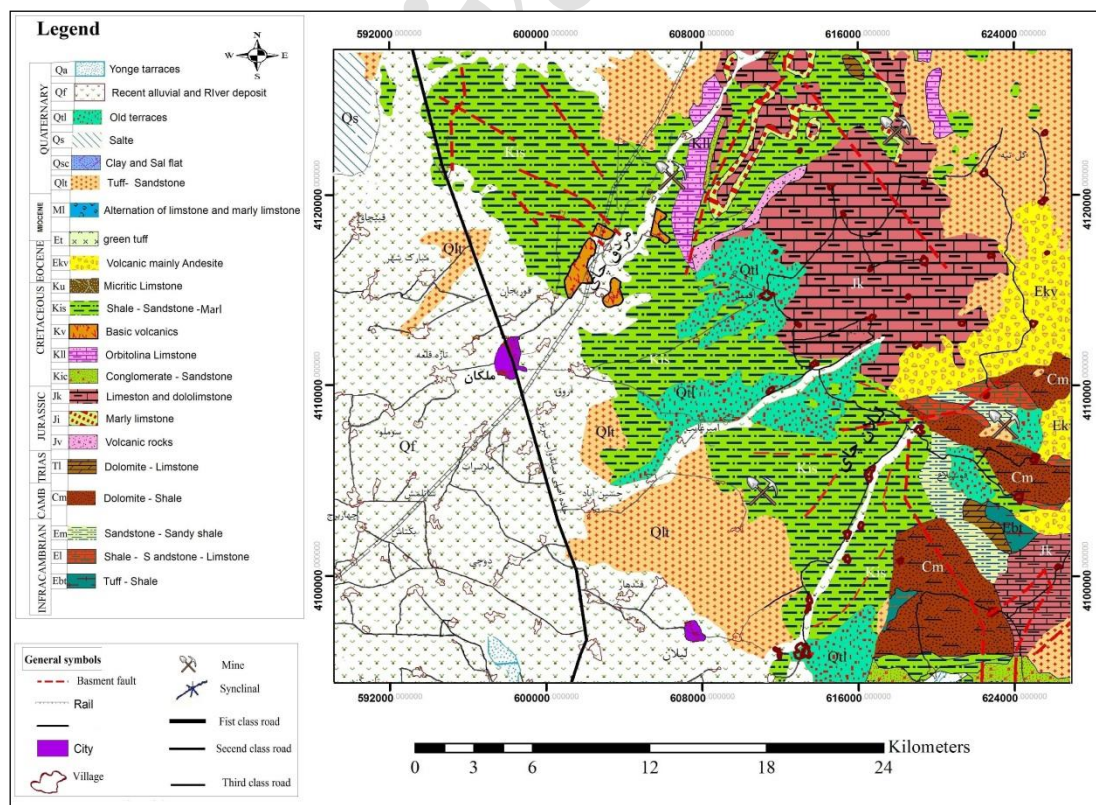
دشت ملکان با وسعتی تقریباً برابر با  $450$  کیلومترمربع در جنوب استان آذربایجان شرقی و در جنوب‌شرق دریاچه ارومیه واقع شده و جزء زون زمین‌ساختاری البرز - آذربایجان محسوب می‌شود. متوسط ارتفاع دشت ملکان  $1320$  متر بوده و اختلاف ارتفاع آن از رأس دشت تا انتهای دشت  $45$  متر است. دشت ملکان از نظر تقسیمات طبیعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار دارد و این حوضه براساس روش تجربی آمبرژه (Emberger, 1952) و با استفاده از آمار ایستگاه ملکان، دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. میزان بارندگی سالیانه منطقه، براساس آمار سی‌ساله (۱۳۶۶-۱۳۹۵) ایستگاه ملکان و میاندوآب در دشت و بخش کوهستانی ملکان به ترتیب  $267$  و  $325$  میلی‌متر و متوسط بارندگی  $273$  میلی‌متر در سال است. میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر از تشک به ترتیب برابر با  $720$  و  $1590$  میلی‌متر در سال است. مردق‌چای و لیلان‌چای از مهمترین



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

واحدهای ماسه سنگی - شیلی کرتاسه یافت می شوند، قسمت اعظم منابع آب منطقه ملکمان را تشکیل می دهند. سازندهای با آبدهی متوسط به بالا نیز در واحدهای آهکی اربیتولین دار، تشکیلات تفکیک ناپذیر ژوراسیک و کرتاسه، واحدهای آهکی لار و دلچای یافت می شوند. همچنین گروه سنگ های تخریبی - آذرآواری با توان آبدهی ضعیف نیز که شامل واحد خاکستر آتش فشانی همراه با سنگ های آذرآواری، کنگلومرا و ماسه سنگ میوسن، واحد مارن های خاکستری با کمی سنگ آهک متعلق به کرتاسه و شیل و آهک دلومیتی متعلق به پرکامبرین هستند، حدود ۳۴ کیلومتر مربع از منطقه را تشکیل می دهند. دیگر سازندها که وسعت زیادی نیز ندارند، آبدهی ضعیفی دارند. این سازندها که در قسمت های غربی به طور گسترده در حاشیه دریاچه ارومیه قرار گرفته اند، دارای سن کواترنری (Qs) و شامل رسوبات رسی هستند که علاوه بر اینکه از نفوذپذیری بسیار کمی دارند، به علت داشتن لایه های گچ و نمک بر کیفیت آبها اثر نامطلوب می گذارند.

آب های زیرزمینی ضمن حرکت در مسیرهای زیرزمینی خود با سازندهای زمین شناسی که دارای لیتولوژی متنوعی هستند، برخورد می کنند و به علت کند بودن حرکتشان فرصت کافی برای واکنش و انحلال آنها دارند. این امر باعث تغییر کیفیت آب و افزایش املاح آن می شود که میزان و نوع املاح به جنس و لیتولوژی سنگها و سازندهای زمین شناسی و زمان ماندگاری آب، بستگی دارد. از طرف دیگر تأثیر تکتونیک در تشکیل یا قطع واحدهای آبدار و سفره های آب زیرزمینی امری روشن است. بر اساس بررسی های هیدروژئولوژیکی، رسوبات کواترنری بیشتر سازندهای آب دار منطقه را در بر گرفته اند و آبدهی خوبی دارند. این نهشته ها شامل رسوبات رودخانه ای (Qal) که در طرفین رودخانه های دائمی و فصلی به صورت کم شیب گسترش دارند، رسوبات واریزه ای Q1 و Qt2 هستند که بیشتر در دامنه ها دیده می شوند و رسوبات Qt1 که تراس های مرتفع را تشکیل می دهند. سنگ های با توان آبدهی متوسط که بیشتر در سازندهای شمشک، لالون و



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

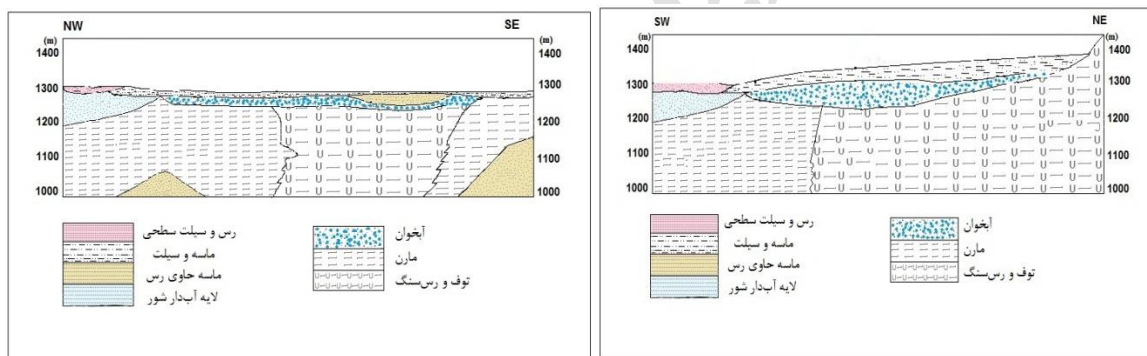
اکثراً با پوششی از رس شور با مقاومت مخصوص ۳ تا ۱۰ اهم متر پوشانده شده است که ضخامت این پوشش گاهی به ۲۰ متر نیز می‌رسد. همچنین از قسمت شرق آبخوان به سمت غرب، به علت ریزدانه شدن رسوبات و افزایش املاح محلول آب‌های زیرزمینی، میزان مقاومت ویژه مواد زمین‌شناسی کاهش می‌یابد (فرسپند آب، ۱۳۸۵).

جدول ۱، ارتباط مقاومت ویژه با جنس ذرات تشکیل‌دهنده آبخوان را بیان می‌کند، هرچه دانه‌بندی آبخوان درشت باشد، از مقاومت ویژه بالایی برخوردار است و در مناطق نزدیک به دریاچه ارومیه که ریزدانه هستند مقاومت ویژه پایین است و به تبع آن میزان قابلیت انتقال نیز دارای مقدار کمتری است.

بر اساس مقاطع شکل ۳، آبرفت‌های دوران کواترنری

جدول ۱. مقادیر مقاومت ویژه لایه‌های زیرزمینی دشت ملکان

| مقاومت ویژه ظاهری به اهم‌متر | شرح   |
|------------------------------|---|
| بیش از ۵۰                    | رسوبات دانه درشت، کنگلومرا و توده‌های آذرین |
| ۲۰-۵۰                        | رسوبات آبرفتی آب‌دار حاوی آب شیرین          |
| ۱۰-۲۰                        | رسوبات رسی و ماری                           |
| کمتر از ۵                    | رسوبات دانه‌ریز دارای آب شور                |



(ب)

(الف)

شکل ۳. مقاطع ژئوالکتریک دشت ملکان، (الف) در راستای شمال شرق - جنوب غرب (ب) راستای شمال غرب - جنوب شرق

۱۹۸۷ توسط آلر معرفی شد و آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا آن را در سال ۱۹۹۰ توسعه داد که به این طریق بتوانند این روش را به‌عنوان سیستمی استاندارد شده برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده کنند (Boughriba et al. 2009). در روش دراستیک ۴ فرض در نظر گرفته می‌شود که شامل: ۱. آلودگی از سطح زمین وارد آب زیرزمینی می‌شود؛ ۲. آلودگی از طریق بارندگی شسته شده و وارد آب زیرزمینی می‌شود؛ ۳. انتقال آلودگی از

## ۲.۲. روش دراستیک

روش دراستیک مدلی کمی است که برای برآورد پتانسیل آلودگی سیستم آب زیرزمینی در مقیاسی ناحیه‌ای طراحی شده است. بر اساس 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، ۱۳۸۸). روش دراستیک نخستین بار در سال

شاخص بیان گر آسیب پذیری بیشتر آب های زیرزمینی است. رتبه بندی و محدوده تقسیمات پارامترهای دراستیک در جدول ۲ آمده است. نتیجه نهایی برای هر مجموعه هیدرولوژیکی ارزشی عددی است که از مجموع حاصل ضرب وزن هر پارامتر در رتبه آن به دست می آید و به عنوان شاخص دراستیک<sup>۴</sup> معرفی می شود. بر طبق مقاله آلر و همکاران (۱۹۸۷) در تعیین شاخص دراستیک برای آبخوان تحت فشار وزن دهی مانند آبخوان آزاد است با این تفاوت که رتبه دهی در آبخوان تحت فشار برای ۴ لایه متفاوت از آبخوان آزاد انجام شده، که این ۴ لایه عبارت اند از لایه عمق، محیط آبخوان و محیط غیراشباع. اگر آبخوان تحت فشار در زیر آبخوان آزاد واقع شده باشد علاوه بر این سه پارامتر نحوه رتبه دهی و محاسبه تغذیه خالص هم متفاوت خواهد بود که این نمونه برای آبخوان منطقه مورد مطالعه صادق نیست در واقع در تهیه لایه عمق برای تحت فشار، ژرفای کف لایه محبوس کننده به عنوان عمق سطح ایستابی و لایه محیط آبخوان از زیر لایه نفوذناپذیر تا سنگ کف در نظر گرفته می شود. در بخش هایی که لایه نفوذناپذیر ضخامت بالایی داشته باشد باز امکان آلاینده گی آبخوان کمتر می شود و محیط غیراشباع به صورت لایه محصورکننده در نظر گرفته شده که شامل سیلت و رس نفوذناپذیر است.

طریق آب و با سرعتی مشابه آن صورت می گیرد و ۴. منطقه مورد مطالعه با این روش باید ۴ هکتار یا بزرگ تر باشد (Voudouris et al. 2010). روش دراستیک برگرفته از هفت پارامتر هیدرولوژیکی است که شامل: عمق آب (D)، میزان تغذیه (R)، محیط آبخوان (A)، جنس بافت خاک (S)، شیب توپوگرافی (T)، تأثیر محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی سفره (C) هستند که به هر کدام از این پارامترها با توجه به پتانسیل آلودگی آن، نرخی از ۱ تا ۱۰ اختصاص داده می شود. ۱ به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می شود (Panagopoulos et al. 2005). هریک از پارامترهای روش دراستیک با توجه به اهمیت نسبی آن در توانایی انتقال آلودگی به سیستم آب زیرزمینی در ضریب وزنی (وزن ۱ تا ۵) ضرب می شود. از این رو شاخص دراستیک بر اساس وزن دهی به مجموع هفت پارامتر به صورت رابطه (۱) محاسبه می شود.

رابطه (۱)

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

در رابطه بالا DI شاخص آسیب پذیری دراستیک و حروف بزرگ نشان دهنده پارامترهای هفت گانه و r نرخ ارزش (رتبه) و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می شود. پس از محاسبه شاخص دراستیک، نواحی آسیب پذیر آبخوان مشخص می شوند. بزرگ بودن این

جدول ۲. رتبه بندی و امتیاز رتبه های مربوط به هر کدام از پارامترهای روش دراستیک

| توپوگرافی (درصد) |         | محیط خاک |              | محیط آبخوان |                       | تغذیه (سانتی متر 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 ماسه ای  |             | رس و سیلت با 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                        | ۵/۰۸ - ۱۷/۷۸ | ۷                     | ۴/۶ - ۹/۱   |
| ۳                | ۱۲ - ۱۸ | ۸        | گراول و ماسه |             | ماسه و گراول          | ۸                        | ۱۷/۷۸ - ۲۵/۴ | ۵                     | ۹/۱ - ۱۵/۲  |
| ۱                | ۱۸ <    |          |              | ۸           |                       | ۹                        | ۲۵/۴ <       | ۳                     | ۱۵/۲ - ۲۲/۹ |
|                  |         |          |              |             |                       |                          |              | ۲                     | ۲۲/۹ - ۳۰/۵ |
|                  |         |          |              |             |                       |                          |              | ۱                     | ۳۰/۵ <      |

ادامه جدول ۲. رتبه‌بندی و امتیاز رتبه‌های مربوط به هر کدام از پارامترهای روش دراستیک

| محیط غیراشباع           |      | هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) |      |
|-------------------------|------|------------------------------|------|
| محدوده                  | رتبه | محدوده                       | رتبه |
| سیلت و رس               | ۲    | ۴ >                          | ۱    |
| سیلت و رس با کمی ماسه   | ۴    | ۴-۱۲                         | ۲    |
| ماسه با اندکی سیلت و رس | ۶    | ۱۲-۲۸                        | ۴    |
| گراول و ماسه            | ۸    |                              |      |

(Aller et al., 1987)

جدول ۳. وزن‌های اختصاص یافته به پارامترهای روش دراستیک

| وزن نسبی | پارامترهای دراستیک |
|----------|--------------------|
| ۵        | عمق آب زیرزمینی    |
| ۴        | تغذیه خالص         |
| ۳        | محیط آبخوان        |
| ۲        | محیط خاک           |
| ۱        | توپوگرافی          |
| ۵        | محیط غیراشباع      |
| ۳        | هدایت هیدرولیکی    |

(Aller et al., 1987)

### ۳.۲. منطق فازی

هیدرولیکی، تراوایی و قابلیت انتقال استفاده می‌شود. مدل‌سازی فازی به سه روش فازی ممدانی (MFL)، روش سوگونو (SFL) و لارسن (LFL) قابل اجراست. تفاوت روش سوگونو با دو روش دیگر در خروجی آن‌هاست، در روش سوگونو تابع عضویت داده‌های خروجی سیستم فازی به صورت رابطه خطی یا ثابت است که توسط روش دسته‌بندی به دست می‌آید. نخستین مرحله در ایجاد مدلی فازی دسته‌بندی داده‌هاست که بسته به نوع مدل فازی استفاده شده، می‌توان از روش‌های دسته‌بندی مختلف استفاده کرد. از روش دسته‌بندی کاهشی<sup>۶</sup> برای روش ساگونو و از روش دسته‌بندی میان مرکز<sup>۷</sup> (FCM) برای روش ممدانی و لارسن استفاده می‌شود. هر مدل فازی شامل سه مرحله اصلی است: الف. فازی کردن داده‌ها؛ که این عمل با تعریف تابع عضویت انجام می‌شود، ب. ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی؛ که این کار نیز با یک سری قوانینی مانند اگر آنگاه (if-then) انجام می‌شود و ج. مرحله آخر که مرحله

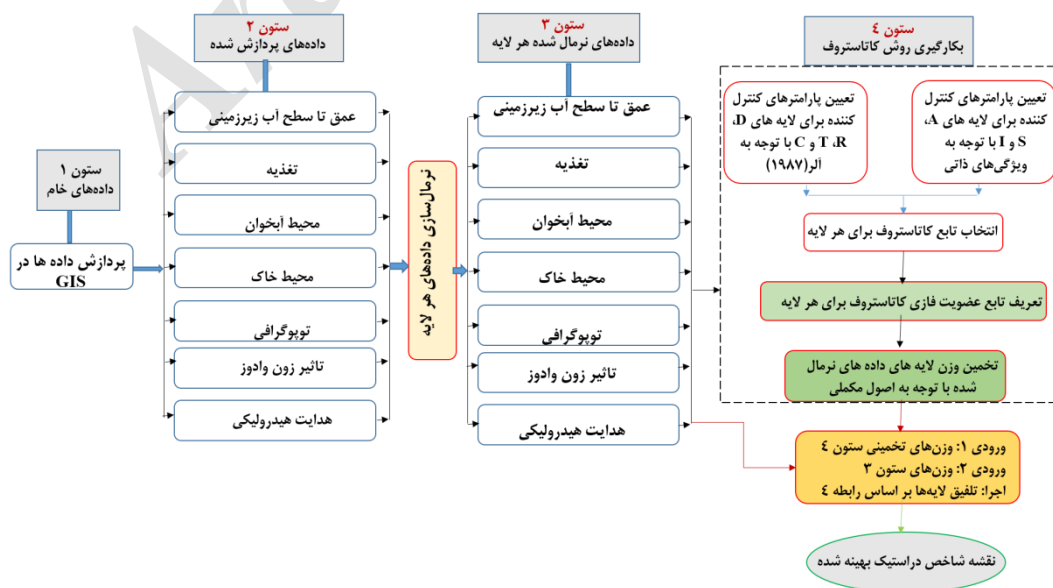
منطق فازی<sup>۵</sup> نگرشی چند ارزشی به وقایع و رویدادها دارد که این برخلاف منطق صریح یا دو ارزشی است که در آن همه چیز یا درست است یا درست نیست. در حقیقت روش فازی روشی مناسب برای کاهش خطای برآوردی و انسانی نسبت به تئوری‌های قابل اعتماد دیگر است (Chiu et al., 2003; Nikravesh et al., 1994). تابع عضویت تابعی است که توسط آن داده‌های ورودی فازی می‌شوند. یعنی هر ورودی به سیستم فازی به عددی در فاصله صفر تا یک تبدیل می‌شود. توابع عضویت هم برای داده‌های خروجی و هم داده‌های ورودی تعریف می‌شوند. انواع مختلفی توابع عضویت وجود دارد که از جمله آن‌ها، تابع عضویت سیگموئید، گوسی، دابل گوسی، مثلثی، ذوزنقه‌ای و غیره را می‌توان نام برد. به‌طور کلی در منطق فازی دو بحث مدل‌سازی و دسته‌بندی فازی مطرح است که از مدل‌سازی فازی برای تخمین پارامترهای عددی مانند تخلخل، هدایت

می‌شوند، منطبق کرد. نظریه کاتاستروف روشی برای فرایند تغییرات سازمان‌دهی شده است. به طوری که اگر بخواهیم از تغییرات ناگهانی دوری کنیم باید از قبل تغییرات تدریجی و پیوسته را مدیریت کرده تا بتوان استراتژی‌هایی برای رسیدن به حالت آتی موردنظر، تدوین کرد (Wang et al. 2011). تئوری کاتاستروف به دنبال بررسی چگونگی تغییر جواب‌های سیستم معادلات در ازای تغییر پارامترهای سیستم است. زمانی که پارامترها تغییر می‌یابند، ممکن است جواب‌ها از مقداری به مقدار دیگر جهش یابند. برای بررسی آسیب‌پذیری تئوری کاتاستروف همراه با تابع عضویت فازی بکار برده می‌شود (Ahmed et al. 2014). Butterfly, hyperbolic umbilical, dovetail, cusp, swallowtail و parabola umbilical هفت نوع مدل از کاتاستروف هستند (Wang et al. 2012). در مطالعه حاضر تئوری کاتاستروف برای شناسایی مناطق مستعد آلودگی آبخوان طی مراحل زیر استفاده می‌شود: الف. پردازش لایه‌های رستری داده‌ها؛ ب. نرمال‌سازی لایه‌های داده‌ها؛ ج. محاسبه برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی و د. تجزیه و تحلیل مقادیر وزنی. شکل ۴ فلوجارت مراحل تهیه نقشه آسیب‌پذیری با روش تئوری کاتاستروف را نشان می‌دهد.

بررسی سیستم، جمع‌بندی نتایج و غیرفازی سازی است. در این مطالعه از روش فازی سوگنو استفاده شده است. در مطالعه حاضر، نخست مدل دراستیک اولیه برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد و سپس مدل دراستیک اولیه با توجه به غلظت‌های نیترات آب زیرزمینی بر اساس منطق فازی بهینه شد.

#### ۴.۲. دراستیک اصلاح‌شده با استفاده از تئوری کاتاستروف

از آنجا که روش دراستیک در مکان‌های مختلف بدون هیچ تغییری استفاده می‌شود، می‌تواند آثار نوع و ویژگی‌های آلودگی را در نظر نگیرد. بنابراین، این روش باید برای آبخوان خاص و نوع آلودگی، کالیبراسیون و تصحیح شود (Sadghfam et al., 2016). یکی از روش‌هایی که می‌تواند برای بهینه کردن وزن‌های روش دراستیک استفاده شود، مدل‌سازی با استفاده از روش کاتاستروف است. مدل‌سازی کاتاستروف پیش‌بینی وقایع را فراهم می‌کند. نظریه کاتاستروف بخشی از توپولوژی ریاضی است که توسط زنه تام ریاضی‌دان فرانسوی در سال ۱۹۷۰ ابداع شد. تغییرات ناگهانی سیستم‌های دینامیکی در اثر تغییرات تدریجی پارامترهای مؤثر بر آن، کاتاستروف نامیده می‌شود. با این نظریه می‌توان تغییرات زمانی و مکانی یک سیستم را روی اشکال هندسی که مدل‌های کاتاستروف نامیده



شکل ۴. فلوجارت بررسی آسیب‌پذیری با روش تئوری کاتاستروف



## ۲.۴.۲. انتخاب تابع کاتاستروف

در این مرحله از روش کاتاستروف، تابع با توجه به تعداد پارامترهای کنترل کننده یا طبقه بندی ها انتخاب می شود (جدول ۴). برای مثال، از آنجاکه هدایت هیدرولیکی به ۴ کلاس طبقه بندی شده است، پس دارای ۴ پارامتر کنترل کننده است، طوری که کاتاستروف Butterfly، تابع مناسب است. در معادله های زیر،  $x_a, x_b, x_c, x_d$  و  $x_e$  متغیرهای حالت مربوط به پارامترهای کنترل  $a, b, c, d$  و  $e$  هستند. بعد از انتخاب توابع عضویت فازی برای هر لایه، باید وزن لایه ها محاسبه شود. در این مرحله، پارامترهای دراستیک با توجه به اصل مکمل و مقدار میانگین پارامترهای کنترل نرمال شده وزن می گیرند، که در اصول مکمل، میانگین پارامترهای کنترل کننده، وضعیت سیستم را نشان می دهند. در وزن های تخمینی برای لایه ها، حداکثر وزن برای پارامتری تعیین می شود که دارای حداکثر مقدار حالت سیستم است و حداقل وزن برای پارامتری تعیین می شود که دارای حداقل مقدار حالت سیستم است. در آخرین مرحله اصلاح روش دراستیک با استفاده از فرمول زیر صورت می گیرد.

رابطه (۴)

$$\text{Normalized DRASTIC Index} = D_R D_N + R_R R_N + A_R A_N + S_R S_N + T_R T_N + I_R I_N + C_R C_N$$

که در آن،  $D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w$  و  $C_w$  وزن پارامترهای دراستیک بر اساس تئوری کاتاستروف  $D_N, R_N, A_N, S_N, T_N$  و  $I_N, C_N$  وزن پارامترها بر اساس دراستیک معمولی است.

## ۱.۴.۲. نرمال سازی داده ها

پارامتر مختلف روش دراستیک واحدهای اندازه گیری متفاوتی دارند و در تجزیه و تحلیل داده ها در مدل، امکان استفاده از واحدهای مشابه وجود ندارد. علاوه بر این، تمام پارامترهای دراستیک پس از ساخت لایه های داده های پردازش شده، باید نرمال شوند.

نرمال سازی تمام پارامتر دراستیک بین ۰ تا ۱، برای واحدهای مختلف با اختلاف مقادیر مختلف است. معادله های زیر برای نرمال سازی داده ها در مطالعه حاضر استفاده می شوند. معادله زیر برای لایه هایی استفاده می شود که دارای ارتباط مستقیم با آلودگی آب های زیرزمینی هستند (هدایت هیدرولیکی، محیط آبخوان، نرخ تغذیه، محیط خاک و تأثیر منطقه وادوز).

رابطه (۲)

$$x_i^n = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

و معادله ای که برای لایه هایی که دارای تناسب معکوس با آلودگی آب های زیرزمینی (عمق آب زیرزمینی و توپوگرافی) هستند به صورت زیر است:

رابطه (۳)

$$x_i^n = 1 - \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

که  $x_{\min}$  و  $x_{\max}$  به ترتیب، حداکثر و حداقل مقدار یک پارامتر است و  $x_i^n$  مقدار نرمال شده داده است.

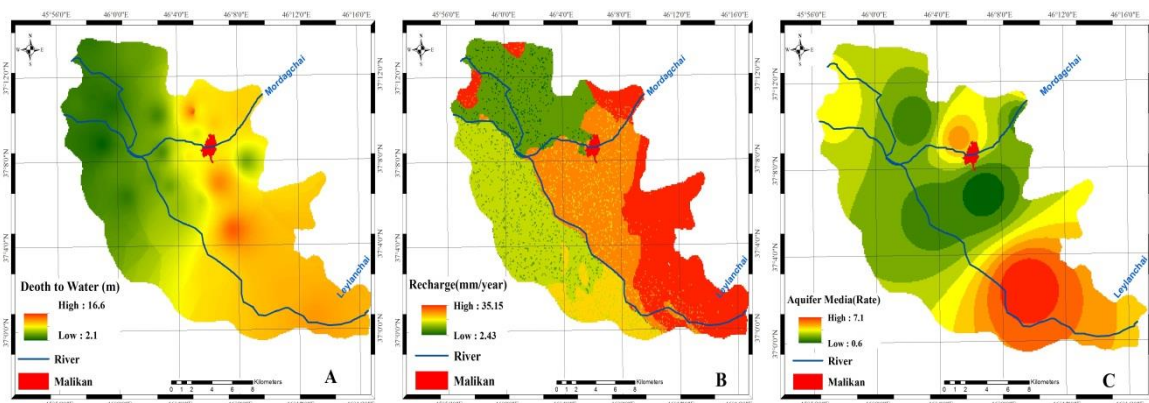
جدول ۴. توابع عضویت فازی کاتاستروف

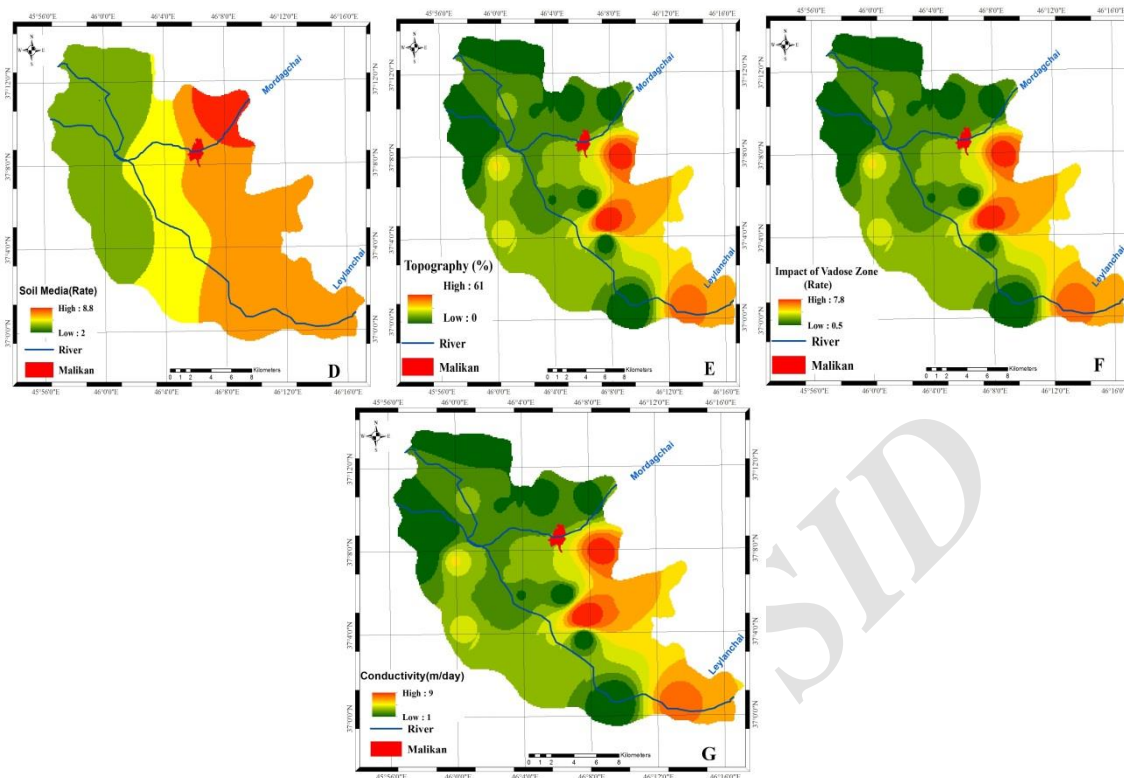
| نام تابع    | حالت متغیر | پارامترهای کنترل کننده | فرمول های نرمال سازی  |
|-------------|------------|------------------------|---|
| Butterfly   | ۱          | ۴                      | $x_a=a^{1/2}, x_b=b^{1/3}, x_c=c^{1/4}, x_d=d^{1/5}$              |
| Swallowtail | ۱          | ۳                      | $x_a=a^{1/2}, x_b=b^{1/3}, x_c=c^{1/4}$                           |
| Wigwam      | ۱          | ۵                      | $x_a=a^{1/2}, x_b=b^{1/3}, x_c=c^{1/4}, x_d=d^{1/5}, x_e=e^{1/6}$ |

### ۳. بحث و نتایج

در مطالعه حاضر از ۲۷ چاه مورد نظر با پراکندگی مناسب نمونه برداری شد و بعضی پارامترهای فیزیکوشیمیایی (pH, EC, T) در محل نمونه برداری اندازه گیری شد. آنالیزهای هیدروشیمیایی در آزمایشگاه آب شناسی دانشگاه تبریز انجام شده و مقادیر نترات نمونه های برداشت شده به دست آمدند. شکل ۵ لایه های استفاده شده در مدل سازی را نشان می دهد. عمق سطح ایستابی تعیین کننده عمقی است که آلوده کننده بایستی طی کند تا به سطح ایستابی برسد. هر چه عمق سطح ایستابی بیشتر باشد، زمان بیشتری طول می کشد تا این مواد آلاینده به آبخوان برسد و امکان پخش شدن، رقیق شدن و جذب مواد آلاینده در خاک وجود خواهد داشت. تغذیه خالص مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح ایستابی می رسد. یکی از راه های اصلی انتقال آلاینده ها به آب زیرزمینی تغذیه است. تغذیه آب موجب می شود تا آلوده کننده به منظور ثقل انتقال یافته و به سطح ایستابی برسد و به صورت افقی در آبخوان حرکت کند. محیط آبخوان شامل فضاهای خالی شکستگی هایی است که آب را در خود نگه داشته و عبور می دهند. بنابراین مواد تشکیل دهنده آبخوان بر جریان درون آن تأثیر می گذارد. این مسیر، جریان حرکت آلاینده ها را از طریق این محیط تعیین می کند. محیط خاک معمولاً با ضخامتی حدود ۰/۵ تا ۲ متر به لحاظ میکروبیولوژی منطقه بسیار فعال به شمار می رود. لایه خاک به دلیل فعالیت نسبتاً

بالای میکروبی، وجود مواد آلی بالا و وجود ریشه گیاهان، برای حذف و کاهش غلظت آلاینده ها از پتانسیل بالایی برخوردار است. در روش دراستیک به ۱۰ نوع خاک به ترتیب رتبه ۱ تا ۱۰ اختصاص یافته که به ترتیب کمترین و بیشترین رتبه برای رس غیر متراکم و گراول است. توپوگرافی برحسب شیب و تغییرات آن عامل کنترل کننده ای در نفوذ آلاینده ها و تشکیل رواناب به شمار می رود. افزایش شیب توپوگرافی موجب کاهش ماندگاری آب بر سطح زمین و کاهش نرخ نفوذ و کاهش شیب نیز موجب افزایش نرخ نفوذ شده است و پتانسیل آلودگی بیشتری را ایجاد می کند. منطقه غیراشباع، رسوبات موجود از سطح ایستابی تا زون خاک را شامل می شود که اساساً غیراشباع است و عبور و رقیق شدن مواد آلاینده را به منطقه اشباع کنترل می کند. برای تهیه لایه محیط غیراشباع، در هر دو نوع مدل از لاگ چاه های مشاهده ای و اکتشافی استفاده شده است. هدایت هیدرولیکی، توانایی مواد تشکیل دهنده آبخوان در انتقال آب را گویند که به درصد فضاهای خالی مرتبط به هم در لایه آب دار بستگی دارد. پس هر چه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد امکان جریان یافتن آلاینده ها در آبخوان بیشتر خواهد بود. اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی از محاسبات آزمایش پمپاژ حاصل می شود مقادیر به دست آمده به فرمت قابل قبول برای ArcGIS تبدیل و درون یابی شد.





شکل ۵. لایه‌های رستری استفاده شده در آسیب‌پذیری

برای استخراج قوانین به کار می‌رود. کاهش این پارامتر باعث افزایش دسته‌ها و قوانین می‌شود و افزایش آن به سمت یک، باعث کاهش دسته‌ها و قوانین خواهد بود. بازده روش فازی بستگی به تعیین شعاع بهینه دسته‌بندی دارد که در برآورد سطح ایستابی مقدار بهینه آن  $0/6$  تعیین شد. توابع عضویت استفاده شده برای مدل‌سازی فازی، تابع عضویت گوسی بود که به داده‌های دسته‌بندی شده برازش داده شد و نیز تابع عضویت خروجی مدل سوگونو تابعی است خطی که بر اساس ورودی‌ها ساخته می‌شود. در روش منطق فازی نخست در مرحله آموزش مقادیر آسیب‌پذیری تصحیح شد و سپس با آموزش مدل‌های فازی، صحت سنجی با استفاده از مقادیر آسیب‌پذیری و نیترا انجام شد. بر اساس نتایج منطق فازی ساگونو از بین روش‌های لارسن، ممدانی و ساگونو دارای بیشترین بازده، کمترین درصد خطا و توانایی بالا در بهینه‌سازی روش دراستیک در منطقه مورد مطالعه هستند. جدول ۵، نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌سازی فازی در مراحل آموزش و آزمایش را نشان می‌دهد.

### ۱.۳. روش منطق فازی

نخستین مرحله در روش فازی، دسته‌بندی داده‌ها و تعیین توابع عضویت است که در اینجا از روش کاهش استفاده شد که روشی کارا و مفید در دسته‌بندی داده‌ها، تعیین توابع عضویت و قوانین در تحقیقات اخیر بوده است. در این سیستم استنتاج فازی از یکسری قوانین اگر-آنگاه فازی برای برقراری ارتباط بین توابع عضویت داده‌های ورودی و توابع عضویت داده‌های خروجی استفاده شده است. پارامتر اصلی در این روش دسته‌بندی برای تعیین دسته‌ها و قوانین اگر آنگاه شعاع دسته‌بندی است. توابع عضویت با استفاده از دسته‌بندی کاهش توسط دستور `genfis2(datin, datout, r)` تعیین شد که در آن، `(datin)` داده‌های ورودی، `(datout)` داده‌های خروجی و `r` شعاع دسته‌بندی است که بین صفر تا یک متغیر است. تعریف مقدار بزرگ شعاع دسته‌بندی به تولید تعداد کمی دسته می‌انجامد و تعریف مقادیر کوچک، تعداد زیادی دسته کوچک تولید خواهد کرد. هر یک از دسته‌ها، نماینده یک تابع عضویت است و هر تابع عضویت نیز نشانگر یک مجموعه فازی در داده‌ها است که

جدول ۵. نتایج ارزیابی عملکرد روش منطق فازی در مراحل آموزش و آزمایش

| معیار ارزیابی | R <sup>2</sup> | MSE   |
|---------------|----------------|-------|
| مرحله آموزش   | ۰/۹۱           | ۰/۰۵۹ |
| مرحله آزمایش  | ۰/۹۰           | ۰/۰۴۷ |

تابع عضویت Butterfly برای این لایه انتخاب شد. توابع عضویت فازی بعد از انتخاب برای هر لایه، وزن پارامترهای دراستیک با توجه به اصل مکمل و مقدار میانگین پارامترهای کنترل کننده محاسبه شد. در آخرین مرحله، وزن پارامترهای دراستیک بر اساس اولویت محاسبه شده توسط روش کاتاستروف با تابع عضویت فازی برآورد شده است، که وزن‌های بالاتر نشان‌دهنده بالاترین امتیاز محسوب شده برای متغیرهاست. جدول ۶ نتایج وزن‌های اصلاح شده برای روش دراستیک با استفاده از روش کاتاستروف را نشان می‌دهد.

### ۲.۳. نتایج مدل‌سازی با روش تئوری کاتاستروف

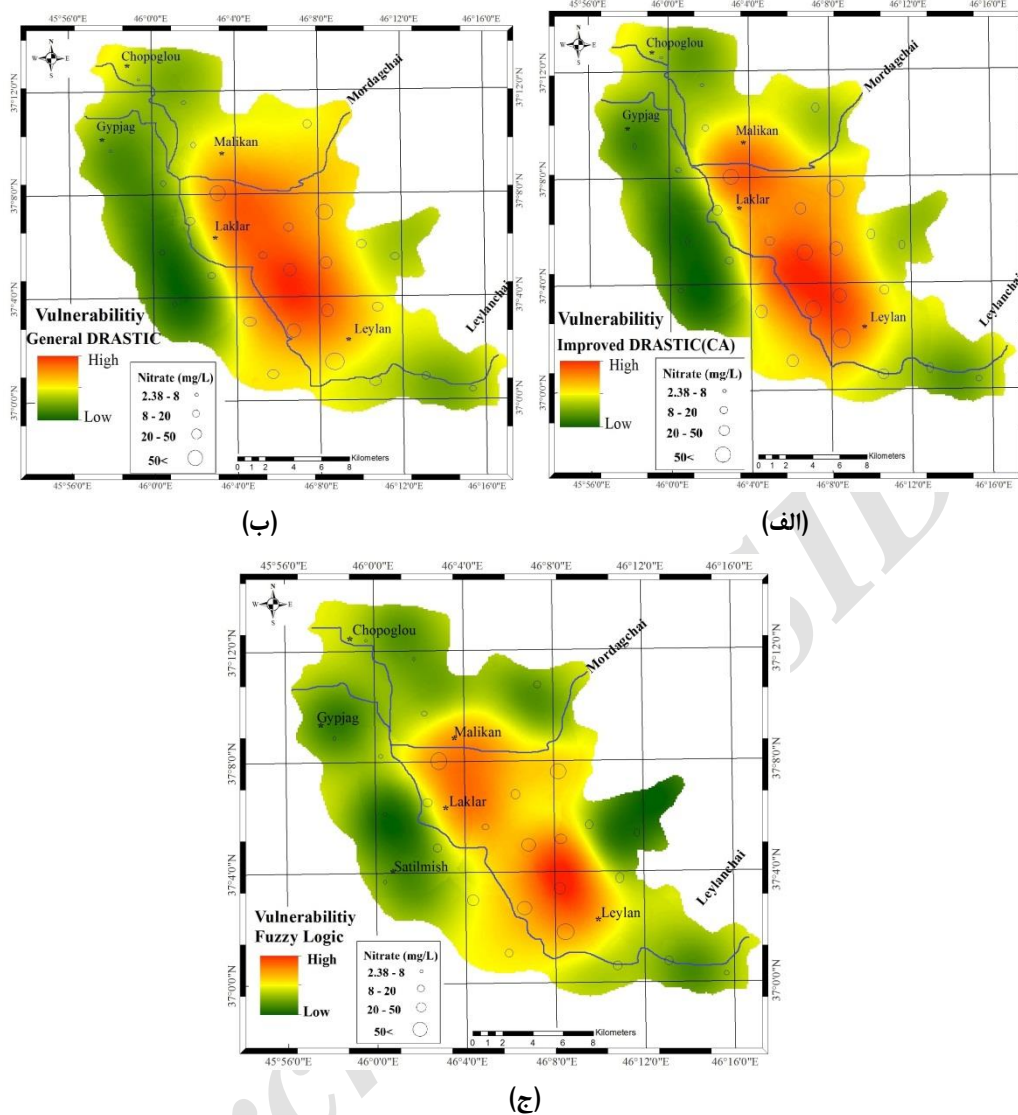
به منظور شناسایی تعداد پارامترهای کنترل کننده، عمق آب زیرزمینی، تغذیه، توپوگرافی و هدایت هیدرولیکی بر اساس روش دراستیک طبقه‌بندی شدند. همچنین طبقه‌بندی محیط آبخوان، محیط خاک و تأثیر زون وادوز بر اساس ویژگی‌های ذاتی آبخوان صورت گرفت. سپس بر اساس تعداد طبقه‌بندی تابع کاتاستروف برای هر پارامتر انتخاب شد. توابع عضویت فازی با استفاده از جدول ۴ و با توجه به تعداد پارامترهای کنترل کننده انتخاب شد. برای مثال با توجه به این هدایت هیدرولیکی دارای ۴ پارامتر کنترل کننده و طبقه‌بندی است، از این رو بر اساس جدول ۴

جدول ۶. جزئیات تعیین وزن با استفاده از روش کاتاستروف

| پارامترهای دراستیک   | محدوده طبقه‌بندی | طبقه‌بندی غالب | میانگین | مقدار نرمال شده میانگین | تابع کاتاستروف | تابع عضویت فازی کاتاستروف | اولویت بر اساس اصل مکمل | وزن‌های دراستیک  |                       |
|----------------------|------------------|----------------|---------|-------------------------|----------------|---------------------------|-------------------------|------------------|-----------------------|
|                      |                  |                |         |                         |                |                           |                         | با روش کاتاستروف | با روش دراستیک معمولی |
| عمق آب زیرزمینی (m)  | ۱/۹۱ - ۱/۱       | کم             | ۱/۳۸    | ۱                       | Butterfly      | ۱                         | ۰/۶۹                    | ۶                | ۵                     |
|                      | ۵/۰۳ - ۱/۹۱      | نسبتاً کم      | ۴/۰۳    | ۰/۷۶                    |                | ۰/۹۱                      |                         |                  |                       |
|                      | ۸/۹۴ - ۵/۰۳      | نسبتاً زیاد    | ۶/۴۳    | ۰/۵۵                    |                | ۰/۸۶                      |                         |                  |                       |
|                      | ۱۵/۶ - ۸/۹۴      | زیاد           | ۱۲/۵۶   | ۰                       |                | ۰                         |                         |                  |                       |
| تغذیه خالص (mm/year) | ۱۳/۳ - ۲/۴۳      | کم             | ۸/۷۲    | ۰                       | Swallowtail    | ۰                         | ۰/۵۸                    | ۱                | ۴                     |
|                      | ۲۴/۰۲ - ۱۳/۳     | متوسط          | ۱۶/۹۱   | ۰/۴۱                    |                | ۰/۷۴                      |                         |                  |                       |
|                      | ۳۵/۱۵ - ۲۴/۰۲    | زیاد           | ۲۸/۶۱   | ۱                       |                | ۱                         |                         |                  |                       |

ادامه جدول ۶. جزئیات تعیین وزن با استفاده از روش کاتاستروف

| پارامترهای<br>دراستیک      | محدوده<br>طبقه‌بندی | طبقه‌بندی غالب                | میانگین | مقدار نرمال شده میانگین | تابع کاتاستروف | تابع عضویت فازی<br>کاتاستروف | اولویت بر اساس اصل مکمل | وزن‌های<br>دراستیک     |                     |
|----------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|
|                            |                     |                               |         |                         |                |                              |                         | با<br>روش<br>کاتاستروف | با<br>روش<br>معمولی |
| محیط آبخوان<br>(rate)      | ۲ - ۰/۶             | رس و سیلت                     | ۱/۰۳    | ۰                       | Butterfly      | ۰                            | ۰/۶۸                    | ۵                      | ۴                   |
|                            | ۴/۳ - ۲             | ماسه با رس و سیلت             | ۳/۷     | ۰/۵۳                    |                | ۰/۸                          |                         |                        |                     |
|                            | ۶/۰۱ - ۴/۳          | ماسه                          | ۴/۹     | ۰/۷۶                    |                | ۰/۹۳                         |                         |                        |                     |
|                            | ۷/۱ - ۶/۰۱          | گراول، ماسه و سیلت            | ۶/۱     | ۱                       |                | ۱                            |                         |                        |                     |
| محیط خاک<br>(rate)         | ۱ - ۰               | رس                            | ۱       | ۰                       | Butterfly      | ۰                            | ۰/۶۴                    | ۳                      | ۲                   |
|                            | ۴ - ۱               | لوم باسیلت                    | ۳/۲     | ۰/۳۱                    |                | ۰/۶۷                         |                         |                        |                     |
|                            | ۸ - ۴               | ماسه، سیلت و گراول            | ۵/۷۱    | ۰/۶۶                    |                | ۰/۹                          |                         |                        |                     |
|                            | ۸/۸۲ - ۸            | گراول و ماسه                  | ۸/۱۴    | ۱                       |                | ۱                            |                         |                        |                     |
| توپوگرافی<br>(percent)     | ۲ - ۰               | کم                            | ۱/۰۳    | ۱                       | Wigwam         | ۱                            | ۰/۷۵                    | ۷                      | ۱                   |
|                            | ۶ - ۲               | نسبتاً کم                     | ۳/۳۲    | ۰/۹۱                    |                | ۰/۹۷                         |                         |                        |                     |
|                            | ۱۲ - ۶              | متوسط                         | ۷/۱۳    | ۰/۷۵                    |                | ۰/۹۳                         |                         |                        |                     |
|                            | ۲۸ - ۱۲             | نسبتاً زیاد                   | ۱۴/۲۱   | ۰/۴۷                    |                | ۰/۸۶                         |                         |                        |                     |
|                            | ۶۱ - ۲۸             | زیاد                          | ۲۶/۰۹   | ۰                       |                | ۰                            |                         |                        |                     |
| محیط غیراشباع<br>(rate)    | ۳ - ۰/۶             | رس همراه با لوم               | ۱/۹     | ۰                       | Butterfly      | ۰                            | ۰/۶۷                    | ۴                      | ۵                   |
|                            | ۵ - ۳               | سیلت، رس و ماسه               | ۴/۱     | ۰/۴۲                    |                | ۰/۷۵                         |                         |                        |                     |
|                            | ۷ - ۵               | ماسه همراه با سیلت و<br>گراول | ۶/۴     | ۰/۸۶                    |                | ۰/۹۶                         |                         |                        |                     |
|                            | ۷/۸ - ۷             | گراول همراه با ماسه و<br>سیل  | ۷/۱۵    | ۱                       |                | ۱                            |                         |                        |                     |
| هدایت هیدرولیکی<br>(m/day) | ۴ - ۰/۱۵            | کم                            | ۱/۱۵    | ۰                       | Butterfly      | ۰                            | ۰/۵۹                    | ۲                      | ۴                   |
|                            | ۱۲ - ۴              | نسبتاً کم                     | ۴/۸۷    | ۰/۱۶                    |                | ۰/۵۴                         |                         |                        |                     |
|                            | ۲۸ - ۱۲             | متوسط                         | ۱۲/۰۳   | ۰/۴۷                    |                | ۰/۸۳                         |                         |                        |                     |
|                            | ۳۴ - ۲۸             | نسبتاً زیاد                   | ۲۴/۱۲   | ۱                       |                | ۱                            |                         |                        |                     |



شکل ۶. نقشه‌های آسیب‌پذیری با استفاده از: الف. دراستیک معمولی، ب. دراستیک بهینه‌شده با تئوری کاتاستروف ج. دراستیک بهینه‌شده با منطق فازی

تغییر یافته و بهینه‌شده است، از این رو مقادیر شاخص آسیب‌پذیری می‌تواند متفاوت از روش معمولی دراستیک باشد. بر اساس نتایج روش کاتاستروف، ۲۱، ۲۳، ۵۶ درصد از منطقه به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد واقع شده‌اند و بخش‌های مرکزی دشت، مناطق آسیب‌پذیر شناخته می‌شوند. همچنین نقشه آسیب‌پذیری با استفاده از روش فازی نشان داد، که حدود ۶۱، ۲۵، ۱۴ درصد از منطقه به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار گرفته‌اند.

از آنجا که با توجه به مقیاس مربوطه محاسبه‌شده برای ۷ متغیر (عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر منطقه وادوز و هدایت هیدرولیکی) وزن از ۷ به ۱ اختصاص می‌یابد. با توجه به معادله ۴، تجزیه و تحلیل مقیاس وزنی با تابع هم‌پوشانی تلفیق شد و نقشه آسیب‌پذیری دشت تهیه شد که در شکل ۶ نقشه‌های آسیب‌پذیری نشان داده شده است. با توجه به اینکه در بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های کاتاستروف و فازی وزن هر لایه با توجه به شرایط محلی منطقه

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 روش‌های آسیب‌پذیری و مقادیر نیترات را نشان دهد. CI بالاتر به معنی همبستگی بیشتر است. انطباق چاه‌های با سه سطح آلودگی نیترات و دسته‌های آسیب‌پذیری پیش‌بینی شده توسط روش‌های دراستیک و دراستیک اصلاح‌شده با روش تئوری کاتاستروف و منطق فازی در جدول ۷ آمده است. بر اساس نتایج حاصل در ارزیابی آسیب‌پذیری، دراستیک تصحیح‌شده با روش تئوری کاتاستروف با داشتن بیشترین شاخص همبستگی (CI) از اولویت بالاتری برخوردار است.

#### ۴. صحت‌سنجی روش‌ها

از آنجایی که نسبت وزن‌های در نظر گرفته‌شده برای لایه‌ها متفاوت است، از این‌رو داشتن معیاری برای مقایسه و تأیید ترکیب ارائه شده ضروری است. به همین دلیل، صحت‌سنجی روش‌های به‌کار برده شده برای محدوده مورد مطالعه با استفاده از یون نیترات انجام شد. در صورتی که غلظت یون نیترات در نقاطی با پراکندگی مناسب و برای یک دوره زمانی مشخص در دسترس باشد، می‌توان مرحله صحت‌سنجی را انجام داد. برای صحت‌سنجی روش‌های استفاده شده در محدوده مورد مطالعه از داده‌های غلظت نیترات استفاده شد. در همین راستا برای بررسی دقیق‌تر و همچنین مقایسه روش‌ها، از روش محاسبه شاخص همبستگی<sup>۸</sup> (CI) که توسط فیجانی (۲۰۱۳) ارائه شد، برای ارزیابی روش‌های مختلف و داده‌های نیترات استفاده شد. برای این منظور مقادیر نیترات به سه دسته نیترات کم، متوسط، زیاد تقسیم‌بندی شده و

جدول ۷. تطبیق مقادیر نیترات در سه سطح آلودگی با روش‌های مختلف

| روش                                  | گروه  | نمونه‌های نیترات |       |       | شاخص همبستگی (CI) |
|--------------------------------------|-------|------------------|-------|-------|-------------------|
|                                      |       | بالا             | متوسط | پایین |                   |
| دراستیک                              | بالا  | ۳                | ۳     | ۳     | CI= ۶۴            |
|                                      | متوسط | ۲                | ۶     | ۲     |                   |
|                                      | پایین | ۱                | ۲     | ۵     |                   |
| دراستیک بهینه‌شده با منطق فازی       | بالا  | ۳                | ۲     | ۲     | CI= ۷۰            |
|                                      | متوسط | ۲                | ۸     | ۲     |                   |
|                                      | پایین | ۰                | ۱     | ۷     |                   |
| دراستیک تصحیح‌شده با تئوری کاتاستروف | بالا  | ۵                | ۲     | ۰     | CI= ۷۶            |
|                                      | متوسط | ۱                | ۸     | ۰     |                   |
|                                      | پایین | ۰                | ۲     | ۹     |                   |

نحوه محاسبه شاخص همبستگی برای دراستیک معمولی:  $84 = (3+2)1 + (2+3+4+2)2 + (8+7+4)3$

## ۵. نتیجه‌گیری

روش‌های فازی برای بررسی آسیب‌پذیری و شناسایی مناطق مستعد آلودگی استفاده شد و برای صحت‌سنجی روش‌های استفاده شده در محدوده مورد مطالعه از داده‌های غلظت نترات استفاده شد. در همین راستا برای بررسی دقیق‌تر و همچنین مقایسه روش‌ها، از روش محاسبه شاخص همبستگی (CI) برای دو روش مختلف و داده‌های نترات استفاده شد. بر اساس نتایج، دراستیک تصحیح شده با استفاده از تئوری کاتاستروف به دلیل داشتن بیشترین شاخص همبستگی (CI) با نترات از اولویت بالاتری در شناسایی مناطق مستعد آلودگی برخوردار است. به‌طور کلی شناسایی مناطق مستعد به آلوده شدن با استفاده از روش‌های مناسب، منابع و عوامل مؤثر در آلودگی، می‌تواند برای مدیریت و نظارت صحیح آب‌های زیرزمینی استفاده شود.

## یادداشت‌ها

1. Point Count System Models
2. National Groundwater Association
3. Catastrophe
4. DRASTIC Index
5. Fuzzy Logic
6. Fuzzy C-Means
7. Subtractive
8. Correlation index

مسائل مربوط به تنزل کیفی آب زیرزمینی در بیشتر موارد به دلیل سرعت کم آب زیرزمینی و ناهمگنی موجود به‌سختی می‌تواند مشاهده شود، به خاطر اینکه وقتی می‌توان به عوامل آلودگی پی برد که آثار آلودگی در چاه پمپاژ مشخص شود. نترات، عمده‌ترین آلاینده آب زیرزمینی در منطقه ملکان است که استفاده شدید از کودهای شیمیایی و حیوانی به دلیل کشت باغ‌های انگور مهم‌ترین عامل افزایش آن در منطقه است که باعث شده تا غلظت آن به چندین برابر مقدار اعلام شده از طرف سازمان بهداشت جهانی برسد. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی بیشتر آبخوان منطقه توسط نترات، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و مدیریت کاربری اراضی است. در این تحقیق سعی شد که از روش منطق فازی و تئوری کاتاستروف برای بهبود نتایج آسیب‌پذیری دراستیک با استفاده از چارچوب هیدروژئولوژیکی استفاده شود. تئوری کاتاستروف برای ارزیابی نقشه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از مراحل زیر استفاده شد: الف. پردازش لایه‌های رستری داده‌ها؛ ب. نرمال‌سازی لایه‌های داده‌ها؛ ج. محاسبه برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی د. تجزیه و تحلیل مقادیر وزنی. همچنین روش منطق فازی ساگنو نیز از بین

## منابع

- اصغری مقدم، ا.، فیجانی، ا. و ندیری، ع. ۱۳۸۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت‌های بازرگان و پلدشت با استفاده از مدل دراستیک بر اساس GIS. مجله محیط‌شناسی، ۵۲: ۵۵-۶۴.
- اصغری مقدم، ا.، فیجانی، ا. و ندیری، ع. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی مدل دراستیک با استفاده از هوش مصنوعی جهت ارزیابی آسیب‌پذیری دشت مراغه - بناب. فصلنامه علوم زمین، ۹۴: ۳۳۱-۳۳۸.
- سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی (شرکت مهندسی مشاور فرسپندآب). ۱۳۸۵. تهیه بیان و چرخه آب در محدوده‌های خلخال، میانه، میانداوآب (ملکان)، عجب‌شیر و شبستر.
- نوروزی، ح.، اصغری مقدم، ا.، ندیری، ع. ۱۳۹۵. تعیین مناطق آسیب‌پذیر آبخوان دشت ملکان به نترات با استفاده از روش جنگل تصادفی. مجله محیط‌شناسی، ۴۱ (۴): ۹۲۳-۹۲۴.



نوروزی، ح. ۱۳۹۴. مطالعه ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملکان با استفاده از مدل‌سازی Random Forest. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، تبریز.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. and Petty, R. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic settings. US EPA/Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. EPA/600/2-85/018.

Antonakos, A., Lambrakis, N. 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*, 12: 288-304.

Babiker, I.S., Mohamed, M.M.A., Hiyama, T. and 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: 127-140.

Baghapour, M.A., Fadaei Nobandegani, A., Talebbeydokhti, N., Bagherzadeh, S., Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Chitsazan, N. 2016. Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability for unconfined aquifer of Shiraz Plain, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. doi.org/10.186/s40201-016-054-y.

Boughriba, M., Barkaoui, A., Zarhloule, Y., Lahmer, Z., El-Houadi, B., Verdoya, M. 2009. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Arabian Journal of Geoscience*, 3:207-220.

Chiu, S. 1994. Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2(4): 267-278.

Dixon, B. 2005a. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis. *Journal of Hydrology*, 309: 17-38.

Emberger, L. 1952. Sur le quotient pluviothermique. *C.R. Sciences*, 234: 2508-2511.

Lee, S. Y. and Gilkes, R. J. 2005. Groundwater geochemistry and composition of hardpans in southwestern Australian regolith. *Journal of Geoderma*, 126(1): 59-84.

Fijani, E., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A., Tsai, F.T.C. and Dixon, B. 2013. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh-Bonab plain aquifer, Iran. *Journal of Hydrology*, 503:89-100.

Niknam, R., Mohammadi, K. and Majd, V. 2007. Groundwater Vulnerability Evaluation of Tehran-Karaj Aquifer Using DRASTIC Method and Fuzzy Logic, *Iran Water Resources Research*, 2: 39-47.

Nikravesh, M. and Aminzadeh, F. 2003. *Soft Computing and Intelligent Data Analysis in Oil Exploration. Part1: Introduction: Fundamentals of Soft Computing*. Elsevier, Berkeley, USA. p.744.

Panagopoulos, G., Antonakos, A. and Lambrakis, N. 2005. Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment by the use of simple statistical methods and GIS, *Hydrogeology Journal*, 12: 432-458.

Piscopo, G. 2001. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia.

Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A. and Zarghami, M. 2016. Localization of Groundwater Vulnerability Assessment Using Catastrophe Theory. *Water Resour Manage*, 30:4585-4601.

Wang, Y., Merkel, B.J., Li, Y., Ye, H., Fu, S. and Ihm, D., 2007. Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. *Environmental Geology*, 53: 479-484.

Voudouris, K., Nazakis, N., Polemio, M. and Kareklas, K., 2010. Assessment of intrinsic vulnerability using the DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer, Cyprus. *European Water journal*, 30:13-24.

Vrba, J. and Zoporozec, A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise GmbH and Co, KG.

Archive of SID