محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۰، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۳، صفحهٔ ۷۲۲-۷۱۱

# تعیین مناسب‌ترین شاخص آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با مقایسهٔ دراستیک فازی و معمولی (مطالعهٔ موردی: آبخوان دشت سرخون)

احمد نوحه‌گر[1]، فاطمه ریاحی*[2]

۱. استاد گروه محیط‌زیست، دانشکدهٔ محیط‌زیست دانشگاه تهران ahmad.nohegar@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه هرمزگان

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۷/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱/۲۷

## چکیده

دشت سرخون نزدیک‌ترین منبع آبرفتی آب شیرین بندرعباس و شهرک‌های اطراف است. بهره‌برداری‌های بی‌رویهٔ آب به خصوص در بخش شرقی دشت، همچنین خشکسالی‌های حاکم بر منطقه موجب منفی‌شدن گرادیان هیدرولیکی آب شده است و رودخانهٔ شورخورجیل که به علت عبور از سازندهای تبخیری و شور دارای کیفیت نامناسب است عملاً دشت را تغذیه می‌کند. به همین دلایل ارزیابی آسیب‌پذیری در تصمیم‌های مدیریتی این دشت حائز اهمیت است. به این منظور در این پژوهش از روش شاخص همپوشانی دراستیک که از کاربردی‌ترین روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری است استفاده شد. سیستم رتبه‌بندی این روش به علت استفاده از منطق بولین به ویژه در مقادیر نزدیک مرزهای دسته‌بندی، قابل اعتماد و درست نیست. در این پژوهش سیستم رتبه‌بندی این شاخص با استفاده از مبانی تئوری فازی که در آن هر موضوع یا مفهومی دارای یک درجهٔ عضویت است اصلاح شد. در این راستا رتبه‌بندی ۴ پارامتر کمّی مدل شامل عمق سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی، تغذیه و شیب با استفاده از عملگر فازی نرم‌افزار MATLAB تصحیح سپس، نقشهٔ نهایی آسیب‌پذیری با اضافه‌شدن پارامترهای کیفی مدل تولید شد. برای مقایسه، نقشهٔ دراستیک با رتبه‌بندی پارامترها (طبق منطق بولین) نیز تولید شد. در مرحلهٔ بعد خروجی مدل فازی و دراستیک معمولی با استفاده از عامل EC به‌منزلهٔ شاخص آلایندگی منطقهٔ مورد مطالعه صحت‌سنجی شد. نتایج همبستگی اسپیرمن، نشان‌دهندهٔ همبستگی بالاتر مدل فازی با عامل EC، نسبت به مدل دراستیک معمولی است و توانایی مدل‌سازی فازی پارامترهای هیدروژئولوژیک، که قطعیت ذاتی ندارند، را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج، از مدل دراستیک فازی به منظور تعیین آسیب‌پذیری ذاتی دشت سرخون استفاده شد. طبق نقشهٔ آسیب‌پذیری حاصل، آسیب‌پذیری ذاتی دشت در ۲ طبقهٔ کم و متوسط قرار گرفت.

## کلیدواژه

ارزیابی آسیب‌پذیری، تئوری فازی، دراستیک، شاخص همپوشانی، همبستگی اسپیرمن.

## ۱. سرآغاز

با توجه به افزایش نیاز مبرم به آب و اینکه یکی از منابع مطمئن بهره‌برداری در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران سفرهٔ آب زیرزمینی است، لذا نقش مدیریت صحیح بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی پررنگ می‌شود. نحوهٔ مدیریت باید به ترتیبی باشد که از آثار زیان‌آوری مانند برداشت مازاد، نامناسب‌شدن کیفیت آب و اثر آن روی آب آشامیدنی و محصولات کشاورزی و نشست زمین در اثر پمپاژ بیش از اندازهٔ آب چه در حال و آینده جلوگیری شود. حفاظت و نگهداری کیفیت آب زیرزمینی در حوزهٔ وسیع شامل دو مجموعه بررسی‌های هیدرولوژیکی و سیاست‌های مدیریتی منابع آب است که

* نویسنده مسئول: تلفن تماس: ۰۹۱۳۱۸۱۲۶۰۱ Email: fateme_riahi@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir

به طور کلی می‌توان این دو مورد را از طریق مؤلفهٔ آسیب‌پذیری بررسی و تشریح کرد.

یکی از راه‌های مناسب برای پیشگیری از آلودگی‌های آتی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر سیستم‌های آب زیرزمینی و مدیریت کاربری اراضی است. بنابراین، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سیستم‌های آب زیرزمینی برای جلوگیری از آلودگی‌های آینده ضروری است. آسیب‌پذیری از نظر مفهومی به دو دستهٔ ذاتی و ویژه تقسیم می‌شود. آسیب‌پذیری ذاتی به مفهوم حساسیت آبخوان به عوامل طبیعی است. این در حالی است که آسیب‌پذیری ویژه، آسیب‌پذیری ذاتی را همراه احتمال قرارگرفتن آب‌های زیرزمینی در معرض نفوذ آلاینده‌ها بررسی می‌کند.

دراستیک مدل شاخص و همپوشانی است که برای تولید نمره‌های آسیب‌پذیری برای نقاط مختلف با ترکیب چندین لایهٔ موضوعی طراحی شده است. مشابه روش‌های دیگر شاخص و همپوشانی، در این روش نیز پارامترهای مختلف هیدروژئولوژیکی که هر یک در انتقال آلودگی تأثیرگذارند، با یک ضریب وزنی و رتبه با یکدیگر جمع می‌شوند و در نهایت نقشهٔ آسیب‌پذیری را ارائه می‌دهند. روش‌های شاخص همپوشانی کاربردی‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به شمار می‌روند، زیرا به نسبت ارزان‌اند، به طور مستقیم به هدف می‌رسند، داده‌های استفاده‌شدهٔ آن در دسترس یا قابل تخمین‌اند، نتایج نهایی آن به آسانی قابل توصیف و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مناسب‌اند (Focazio et al., 2002). این در حالی است که سیستم رتبه‌دهی پارامترهای این روش سیستم غیرمنطقی و غیر قابل اعتماد است. به طور معمول این طبقه‌بندی‌ها بر اساس روش بولین است و که در آن ابتدا باید مرز بین طبقات مشخص شود. بنابراین، با توجه به شاخص‌های آسیب‌پذیری که ماهیت طیفی و دامنه‌دار دارند، اگر طبقه‌بندی بر اساس روش بولین انجام گیرد موجب می‌شود که یک منطقه با کوچک‌ترین تغییر از یک طبقه به طبقهٔ بالاتر یا پایین‌تر جابه‌جا شود که اصولاً پذیرفتنی و توجیه‌شدنی نیست. به نظر می‌رسد با استفاده از مبانی تئوری فازی که در آن هر موضوع یا مفهومی دارای درجهٔ عضویت است، می‌توان روش مناسبی برای طبقه‌بندی و رتبه‌گذاری نسبت به روش بولین ارائه کرد (Malano et al., 1992).

در خصوص آسیب‌پذیری و آلودگی آب زیرزمینی با این مدل تحقیقاتی انجام شده است که از جنبه‌های مختلفی به بررسی موضوع پرداخته‌اند. در ادامه به چند مورد از این مطالعات اشاره می‌شود.

Ketema Tilahun و همکاران (۲۰۰۹) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی یک منطقهٔ نیمه‌خشک در اتیوپی از روش دراستیک و برای تهیهٔ نقشه‌ها و روی‌هم‌گذاری لایه‌های وزن‌داده‌شده از نرم‌افزار Arc View استفاده کردند. آن‌ها نتیجهٔ تحقیق را این طور بیان کردند؛ بخشی از محدودهٔ مطالعاتی که در شهر کوچک دیرداو[1] قرار گرفته است دارای آسیب‌پذیری بالا و بخش غربی محدودهٔ مطالعاتی به علت عمق زیاد آب زیرزمینی، بافت خاک رس و میزان کم تغذیه، دارای آسیب‌پذیری کم است. همین‌طور آن‌ها بیان کردند که در تعدادی از چاه‌های منطقه که در قسمت دیرداو (آسیب‌پذیری بالا) وجود دارند، غلظت نیترات مشاهده‌شده بالاتر از استانداردهای مجاز است، در حالی که در چاه‌هایی که در قسمت غربی قرار گرفته‌اند (آسیب‌پذیری کم) نیتراتی مشاهده نشده است.

Dixon و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از تکنیک‌های منطق فازی، آسیب‌پذیری سفره به آلودگی را در مقیاس منطقه‌ای پیش‌بینی کردند و به این نتیجه رسیدند که در ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، دسته‌بندی اطلاعات و تعیین مرز بین این دسته‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا منطق فازی آسیب‌پذیری را بهتر از روش‌های معمول ارزیابی می‌کند.

Niknam و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقی با عنوان «تهیهٔ نقشهٔ آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از

Archive of SID

www.SID.ir

منطـق فـازی و کـاربرد آن در دشـت تهـران» بـه ارزیـابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در دشت تهران بـا اسـتفاده از مدل دراستیک و منطق فازی پرداختنـد. پـس از اجـرای مدل دراستیک و تهیهٔ نقشه‌های آسیب‌پذیری بـا اسـتفاده از منطق فازی و مقایسهٔ این روش‌هـا بـا هـم بـه ایـن نتیجـه رسیدند که منطق فازی، مناطق آسیب‌پذیر بیشتری را نسبت به روش انـدیس و همپوشـانی دراسـتیک شناسـایی کـرده است.

Toranjian (۲۰۰۹) با توجه به آثار افزایش اسـتفاده از مواد شـیمیایی کشـاورزی روی کیفیـت آب زیرزمینـی بـه بررسی منـاطق مسـتعد آلـودگی در دشـت همـدان- بهـار پرداخت. در این تحقیق با اسـتفاده از روش DRASTIC و به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقشهٔ آسیب‌پذیری دشـت تهیـه شـد. نتـایج مـدل نشـان داد کـه پتانسـیل آسـیب‌پـذیری بـه ترتیـب ۶/۰۹، ۳۷/۵۳، ۴۵/۹۳ و ۱۰/۴۳ درصد از منطقه در محدوده‌های بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم قرار می‌گیرد.

این پژوهش با هدف بهره‌گیری از مبانی تئـوری فـازی در مدل‌سازی پارامترهای هیـدروژئولوژیک دراسـتیک کـه قطعیت ذاتی ندارند، به منظـور تعیـین شـاخص دراسـتیک فازی و مقایسهٔ آن با دراستیک معمولی و بـه دسـت آوردن دقیق‌ترین و مناسب‌ترین شـاخص ارزیـابی آسـیب‌پـذیری ذاتی منطقهٔ سرخون است تا بـه‌منزلـهٔ ابـزار کارآمـد بـرای اتخاذ تدابیر مناسب در اختیار مدیران و مسئولان قرار گیرد.

منطقهٔ مورد مطالعـه در ایـن پـژوهش، آبخـوان دشـت سرخون واقع در استان هرمزگان است. منابع آب زیرزمینی دشت سرخون آب شرب، کشاورزی و صـنعت شهرسـتان بندرعباس را تأمین می‌کنند. حساسیت ویژهٔ ایـن دشـت در تـأمین آب کشـاورزی، صـنعت و بـه خصـوص شـرب بندرعباس و لزوم برداشت آب بیشتر، در سـال‌هـای آینـده اسـت. بـا توجـه بـه مـوارد بـالا و اهمیـت آلـودگی آب زیرزمینی، تحقیقات بسـیار گسـترده‌ای در زمینـهٔ شناسـایی روند این پدیده و تأثیر آن در سطح جهان انجام شده است. متأسفانه در کنار این تحقیقات فراگیر جهانی و با توجه بـه ضرورت تحقیق در این مورد، هنوز تحقیق جامعی در ایـن زمینـه در ایـران صـورت نگرفتـه اسـت و فقـط برخـی از محققان به صورت پراکنده به این امر همت گماشته‌اند.

به طور کلی این تحقیقات مبتنی بر دیدگاه‌هـای خـاص و برای شرایط متفاوت منـاطق مختلـف شـکل گرفتـه‌انـد. بنابراین، برای شرایط اسـتان هرمزگـان، لازم اسـت کـه بـا توجه به ویژگی‌های متفـاوت هیـدروژئولوژی دشـت‌هـای مختلف آن، تحقیقات مربوطه صورت گیرد. آبخوان دشـت سرخون که از مهم‌ترین مناطق کشاورزی و تأمین‌کنندهٔ آب این استان است، در این خصوص مورد توجه قرار گرفته و نقاط آسیب‌پذیر این آبخوان ارزیابی شده است.

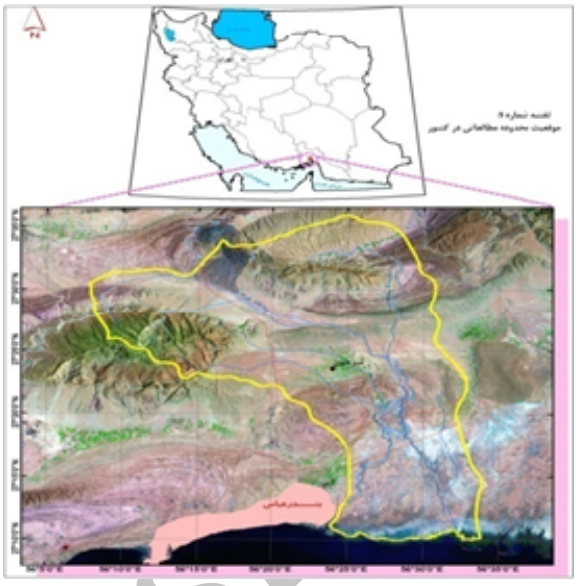
## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲. ۱. منطقهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ مطالعاتی سرخون به فاصلهٔ تقریبـی ۲۵ کیلـومتری از بندرعباس در دامنهٔ شرقی- شمال‌شرقی کـوه گنـو واقـع شده است. این حوضه با مسـاحتی حـدود ۱۰۴۶ کیلـومتر مربع و در حدود عـرض‌هـای شـمالی ´۹ °۲۷ تـا ´۳۵ °۲۷ و طول‌های شرقی ´۷ °۵۶ تا ´۳۳ °۵۶، در حوضهٔ آبریز سرخون واقع شده است (شـکل ۱). رودخانـهٔ شـور واقـع در ایـن محدوده از نظر ساختار مورفولوژیکی تعیین حوضهٔ آبریـز، با زیرحوضهٔ سرخون ارتباطی نـدارد، امـا بـه دلیـل وجـود مناطق بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینـی در حاشـیهٔ شـرقی دشت و ایجاد شیب هیدرولیکی، آن دشت را تغذیه می‌کند. جنس آبرفـت در بخـش غربـی، ورودی و مرکـزی دشـت دانه‌درشت و با پیشروی به سمت شمال‌شـرق و جنـوب و بالاخص شرق و جنوب‌شـرقی (خروجـی دشـت) از قطـر دانه‌بندی آن کاسته می‌شود و حالت دانه‌ریز پیـدا مـی‌کنـد. مهم‌ترین فعالیت انسانی در منطقـهٔ کشـاورزی اسـت و در حاشیه‌های دشت شهرک صنعتی بندرعباس و برخی صنایع کوچک پراکنده شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



**شکل ۱. موقعیت دشت سرخون روی تصویر ماهواره‌ای**

## ۲. ۲. شاخص دراستیک

آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا روش DRASTIC را برای استانداردکردن سیستمی تهیه کرد که آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی را ارزیابی کند. این مدل بر پایهٔ مفهوم وضعیت هیدروژئولوژیکی استوار است. اولین هدف روش DRASTIC اعمال فوریت‌های اجرایی فعالیت‌هایی است که در خصوص آب زیرزمینی صورت می‌گیرند. همچنین، تهیهٔ ابزاری کاربردی برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی به آلودگی از اهداف دیگر این روش است. از روش DRASTIC می‌توان برای تنظیم چگونگی انجام فعالیت‌ها در پایش آب زیرزمینی در یک منطقه استفاده کرد. مشابه روش‌های دیگر شاخص و همپوشانی، در این روش نیز پارامترهای مختلف هیدروژئولوژیکی در انتقال آلودگی تأثیرگذارند. شاخص آسیب‌پذیری در این روش از مجموع حاصل‌ضرب وزن و رتبهٔ هفت پارامتر مطابق فرمول ۱ به دست می‌آید. مدل دراستیک با استفاده از هفت عامل مؤثر در پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. این عوامل شامل عمق تا سطح ایستابی، تغذیهٔ خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، شیب، اثر محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی می‌شوند (Aler et al., 1987). رتبهٔ مربوط به هر پارامتر بین ۱ تا ۱۰ و وزن هر پارامتر با توجه به اهمیت آن بین ۱ تا ۵ متغیر است. عمق تا سطح ایستابی و محیط غیراشباع بیشترین و شیب کمترین ارزش را در بین پارامترهای مذکور دارند. همچنین، هر کدام از پارامترها به بازه‌هایی تقسیم می‌شوند که اثربخشی آن‌ها در پتانسیل آلودگی متفاوت است. نتیجهٔ مدل دراستیک یک اندیس عددی است. بزرگ‌تربودن این اندیس بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر آب‌های زیرزمینی است.

$$D_i = \sum_{j=1}^{7} (Wi \times Rj) \qquad \text{رابطهٔ (۱)}$$

Di= شاخص دراستیک، Wi= وزن فاکتور i، Rj= رتبهٔ فاکتور j

سیستم رتبه‌دهی پارامترهای این روش غیرمنطقی و غیر قابل اعتماد است که می‌توان با اندک دقتی در آن به این نکته پی برد.

## ۲. ۳. منطق فازی

در همهٔ روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، نبود قطعیت و اطمینان امری ذاتی است. این نبود قطعیت ناشی از خطای اطلاعاتی و متغیربودن پارامترهای هیدروژئولوژیک نسبت به زمان و مکان است (Anonymous, 1993). بنابراین، تهیهٔ مدلی انعطاف‌پذیر که توانایی پاسخگویی تحت شرایط نبود قطعیت با کمترین اطلاعات ورودی را دارد، ابزار مدیریتی مناسبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی است. استفاده از منطق فازی در بسیاری از شاخه‌های علوم که به طبقه‌بندی اطلاعات نیازمندند، گسترش فراوانی یافته است. در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نیز دسته‌بندی اطلاعات و تعیین مرز بین این دسته‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است بنابراین، منطق فازی می‌تواند آسیب‌پذیری را بهتر از روش‌های معمول ارزیابی کند (Dixon et al., 2002).

Archive of SID
www.SID.ir

**جدول ۱. توصیف و وزن پارامترهای مدل دراستیک**

| پارامتر | توصیف | وزن نسبی |
|---|---|---|
| عمق سطح ایستابی | عمق از زمین تا سطح ایستابی را بیان می‌کند، سطوح ایستابی عمیق‌تر احتمال آلودگی کمتری دارند. | ۵ |
| تغذیهٔ خالص | مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ می‌کند و به سطح ایستابی می‌رسد، آب تغذیه‌ای عاملی برای انتقال آلاینده‌هاست. | ۴ |
| محیط آبخوان | به خصوصیات مواد منطقهٔ اشباع اشاره دارد که فرایندهای رقیق‌شدن آلاینده‌ها را کنترل می‌کنند. | ۳ |
| محیط خاک | به بخش هوازده بالایی منطقهٔ غیراشباع اشاره دارد و مقدار آب نفوذی را کنترل می‌کند. | ۲ |
| توپوگرافی | به شیب سطح زمین اشاره دارد، هرچه شیب کمتر باشد، زمان تماس آب‌های سطحی و آلاینده‌ها با سطح زمین بیشتر است بنابراین، امکان نفوذ آلاینده‌ها بیشتر خواهد بود. | ۱ |
| منطقهٔ غیراشباع | به‌منزلهٔ مواد منطقهٔ غیراشباع تعریف می‌شود و عبور و رقیق‌شدن مواد آلاینده را به منطقهٔ اشباع کنترل می‌کند. | ۵ |
| هدایت هیدرولیکی | توانایی آبخوان را در انتقال آب نشان می‌دهد، هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد امکان جریان‌یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود. | ۳ |

### ۲. ۴. مراحل تشکیل سیستم استنتاج فازی

۱. تعیین سیستم قاعده‌بنیاد فازی بر اساس داده‌های مشاهده‌ای؛

۲. فازی‌سازی بخش مقدم و تالی با استفاده از توابع عضویت فازی؛

۳. ترکیب قسمت‌های مختلف بخش مقدم هر یک از قواعد و به دنبال آن تعیین شدت و میزان تأثیر قاعدهٔ مزبور در خروجی نهایی سیستم؛

۴. ترکیب بخش تالی قواعد برای به دست آوردن خروجی نهایی سیستم در قالب مجموعهٔ فازی؛

۵. تبدیل خروجی نهایی سیستم به عدد کلاسیک با استفاده از روش‌های غیرفازی‌ساز (در صورتی که نیاز باشد خروجی سیستم در قالب یک عدد کلاسیک بیان شود).

### ۲. ۵. نرم‌افزارهای استفاده‌شده

آنالیز داده‌ها و اجرای مدل‌های به‌کار برده‌شده در نرم‌افزار ARCGIS 9/3 انجام شد. همچنین، برای تصحیح رتبه‌بندی پارامترها از منوی فازی نرم‌افزار MATLAB و صحت‌سنجی مدل و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS 14 استفاده شد.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳. ۱. تهیهٔ نقشهٔ رتبه‌بندی هر یک از پارامترهای شاخص

در روش DRASTIC باید نقشه‌های رتبه‌بندی رقومی هر یک از پارامترها محاسبه شوند به همین علت از نرم‌افزار ARC GIS استفاده شد. برای هر یک از پارامترها، بانک اطلاعاتی با توجه به اطلاعات مورد نیاز شاخص و پارامتر مورد نظر در محیط نرم‌افزار EXCEL تهیه و به فرمت قابل استفاده در محیط ARC GIS تبدیل شد.

نقشهٔ رتبه‌بندی عمق سطح آب با توجه به نقشهٔ هم‌عمق به‌دست‌آمده از آمار و اطلاعات ۲۴ چاه تهیه شد.

برای تهیهٔ نقشهٔ رتبه‌بندی تغذیهٔ خالص دشت، ابتدا بیلان آب زیرزمینی تهیه شد. سپس، با توجه به نقشهٔ هدایت هیدرولیکی دشت و مقدار نفوذپذیری آن، توزیع میزان تغذیهٔ خالص در سطح دشت تخمین زده شد.

با استفاده از لوگ‌های حفاری دشت سرخون و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس محیط آبخوان، خاک و منطقهٔ غیراشباع مشخص و برای تهیهٔ نقشهٔ رتبه‌بندی محیط آبخوان، خاک و منطقهٔ غیراشباع از

Archive of SID
www.SID.ir

موقعیت چاه‌های حفاری، نوع و جنس محیط مورد نظر استفاده شد.

برای تهیهٔ نقشهٔ رتبه‌بندی شیب از نقشهٔ DEM منطقه استفاده شد.

با توجه به آنکه در آزمایش‌های پمپاژ، مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال آب اندازه گیری می‌شود، با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع آبخوان به دست آمد. اطلاعات و نقاط جغرافیایی مربوط به ضریب قابلیت انتقال و ضخامت آبرفت دشت از نقشه‌های موجود تهیه شده است. سپس، از تفریق نقشهٔ هم‌ضخامت آبرفت و هم‌عمق سطح آب، نقشهٔ ضخامت اشباع حاصل شد و پس از تقسیم نقشهٔ ضریب انتقال بر نقشهٔ ضخامت آبخوان نقشهٔ هدایت هیدرولیکی دشت به دست آمد.

### ۳. ۲. فازی‌سازی مقادیر ورودی

اولین مرحله در ایجاد سیستم فازی، تعریف ورودی‌ها و توابع عضویت است. پارامترهای ورودی مدل شامل عمق سطح ایستابی، تغذیهٔ خالص، شیب توپوگرافی و هدایت هیدرولیکی می‌شوند. برای سه پارامتر دیگر مدل دراستیک به علت اینکه مقادیر بینابینی ندارند، امکان فازی‌سازی وجود ندارد. از تابع عضویت گوسی برای فازی‌سازی پارامترها استفاده شد. فازی‌سازی هر پارامتر به صورت مستقل در محیط نرم‌افزار Matlab صورت گرفت. در شکل ۲ توابع عضویت متغیرهای ورودی مدل فازی نشان داده شده است. در این نمودارها درجهٔ عضویت از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

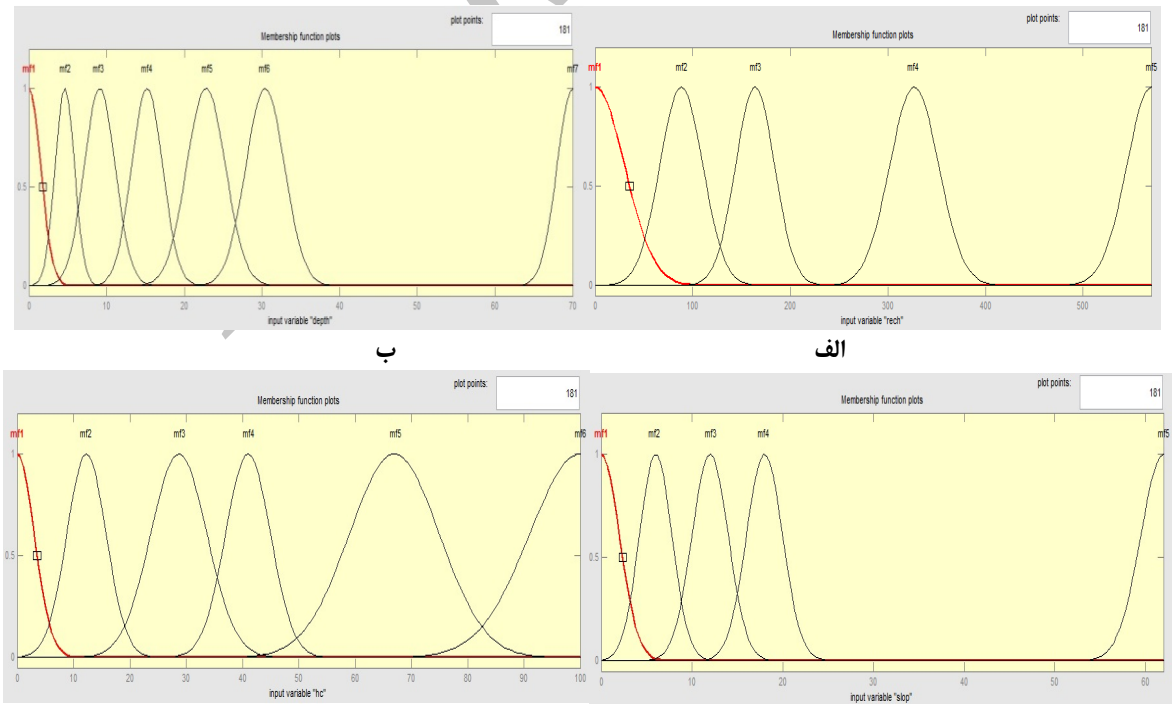
$$\mu(X) = f(x,\sigma,c) = e^{\frac{-(x-c)}{2\sigma^2}}$$ رابطهٔ (۲)

$\mu(X)$ = درجهٔ عضویت پارامتر مورد نظر

X = مقدار پارامتر مورد نظر

C = میانگین تابع گوسی پارامتر مورد نظر

$\sigma$ = انحراف معیار تابع گوسی پارامتر مورد نظر




ب الف

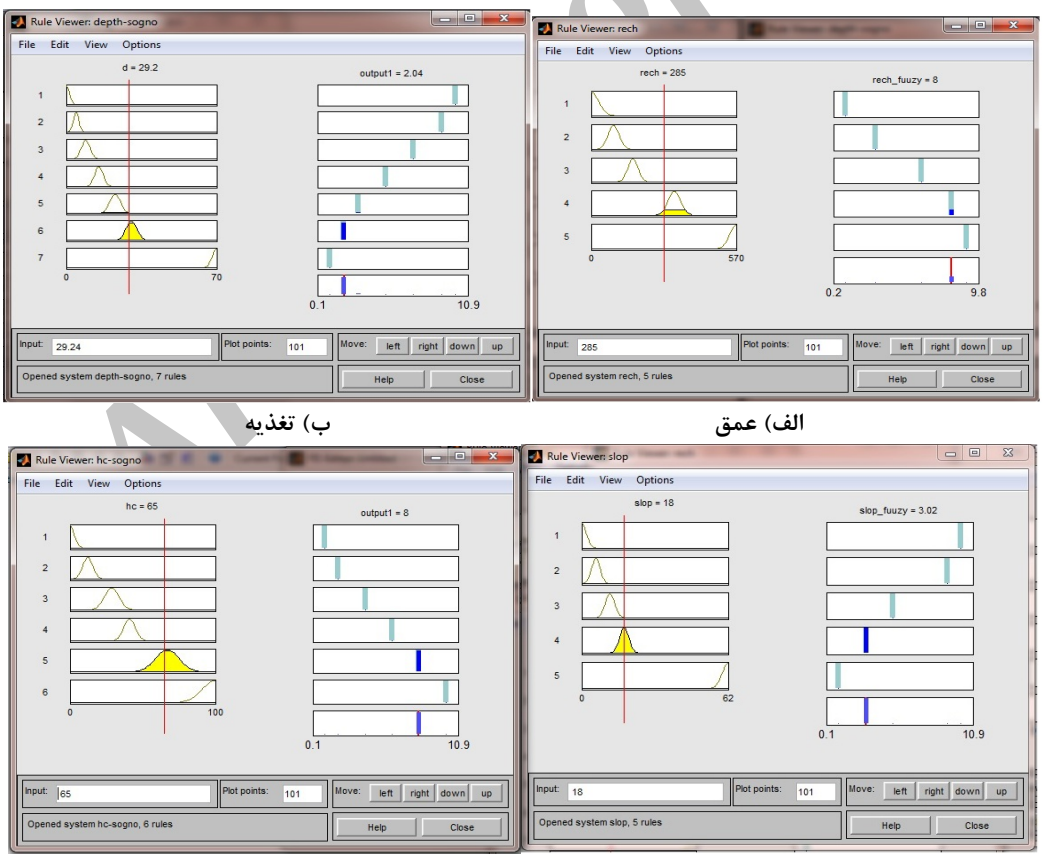
د ج

**شکل ۲. توابع عضویت ورودی پارامترها (الف. تغذیه، ب. عمق، ج. شیب، د. هدایت هیدرولیکی**

Archive of SID
www.SID.ir

پس از فازی‌سازی پارامترهای ورودی، پایگاه قواعد فازی ساخته می‌شود. قواعد فازی با ساختار اگر- آنگاه بیان می‌شود که در هر یک از این قواعد آثار ترکیبی شاخص‌های استفاده‌شده از دیدگاه مورد نظر تعیین می‌شوند. کلیهٔ گزاره‌های فازی ساده و متغیرها عددی هستند. در این تحقیق با توجه به ثابت‌بودن رتبه‌ها در هر یک از قواعد از مدل استنتاج فازی سوگنو استفاده شد. به این ترتیب در این مرحله (۱۰۰ نقطه) کل محدوده در یک لایهٔ shap file جداگانه ترسیم شدند. با استفاده از دستور extract values to points مقادیر عمق سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی، تغذیه و شیب تمام این نقاط به تک تک آن‌ها نسبت داده شد. با تعیین مختصات Utmx و Utmy این نقاط، جدول به صورت فایل excel به خارج از نرم‌افزار منتقل شد.

برای مجموعه‌های فازی ورودی از تابع عضویت گوسی، برای مجموعه‌های فازی خروجی تابع عضویت ثابت (CONSTANT) و برای روش غیرفازی‌سازی در این مدل از روش میانگین وزنی و استنتاج سوگنو استفاده شد. در پایان بر مبنای ورودی‌های غیرفازی (همان مقادیر لایه‌های بالا) خروجی‌ها (رتبه‌های واقعی این مقادیر) به دست آمدند (شکل ۳). سرانجام جدول شکل‌گرفته از نقاط دارای مختصات و رتبه وارد نرم‌افزار GIS شد. با استفاده از روش IDW درون‌یابی روی نقاط دارای رتبه انجام شد تا رتبه‌های تمامی پیکسل‌ها حاصل شوند و به این ترتیب نقشهٔ رتبه‌دهی این پارامترها به دست آمد (شکل ۴).

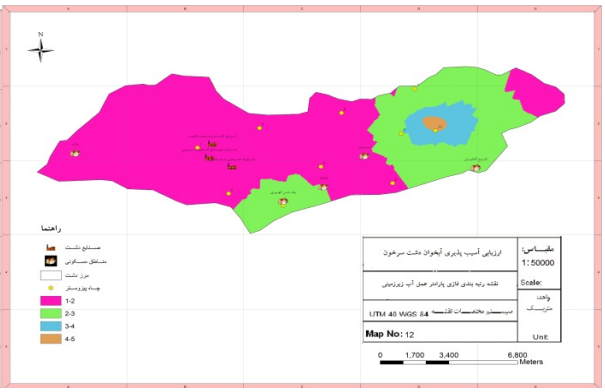



الف) عمق ب) تغذیه

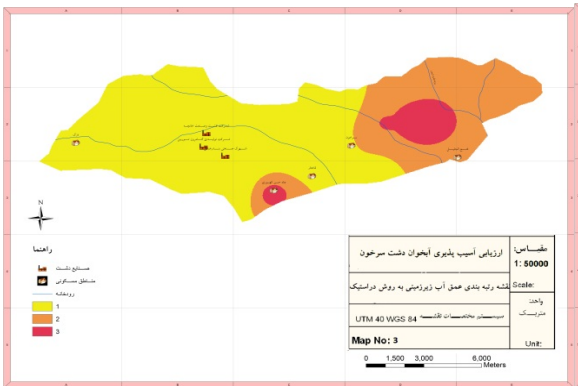
ج) هدایت هیدرولیکی د) شیب

**شکل ۳. خروجی رتبه‌بندی نرم‌افزار فازی متلب**

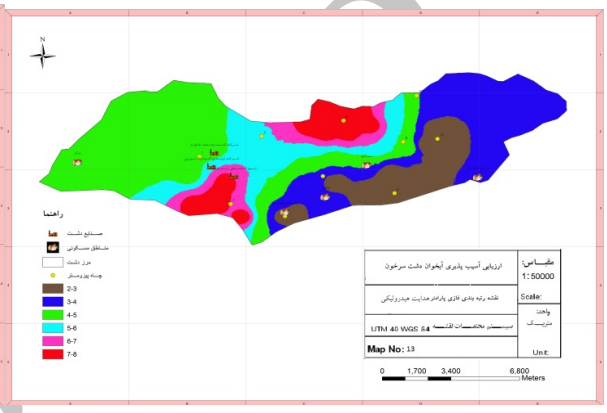
Archive of SID
www.SID.ir



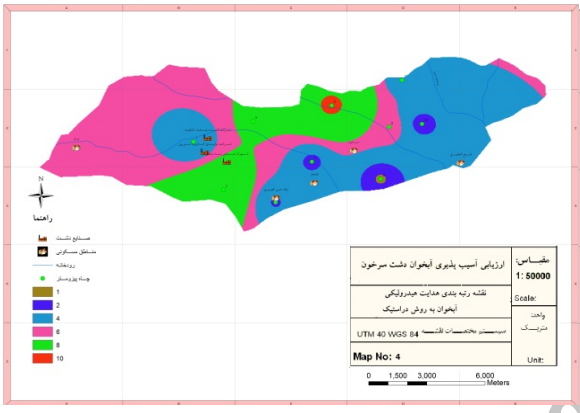

الف) عمق دراستیک معمولی



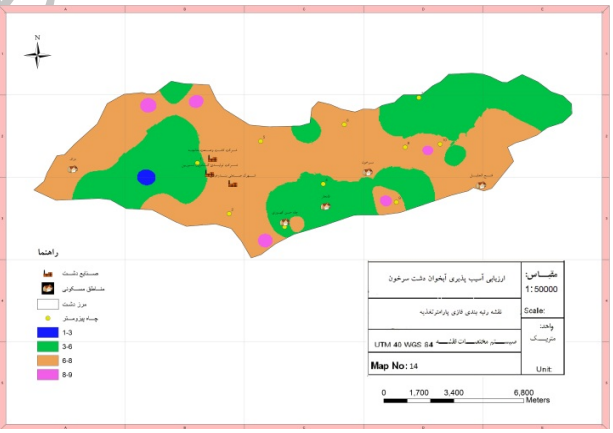

ب) عمق دراستیک فازی



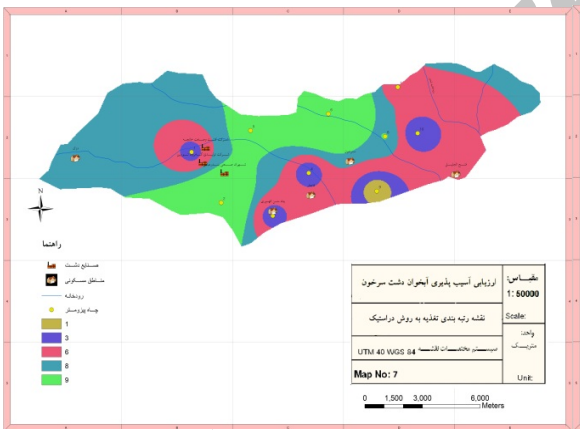

پ) هدایت هیدرولیکی دراستیک معمولی



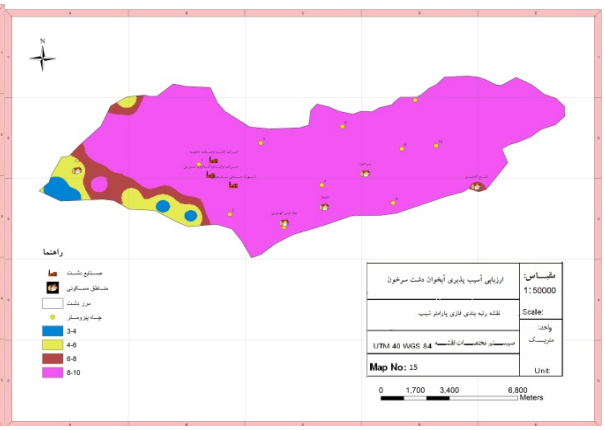

ت) هدایت هیدرولیکی دراستیک فازی



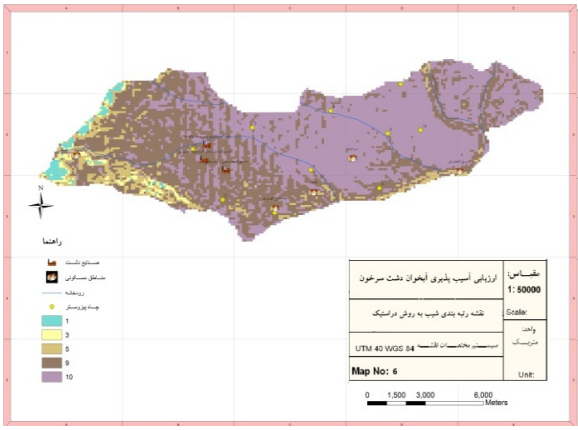

ث) تغذیهٔ دراستیک معمولی




ج) تغذیهٔ دراستیک فازی

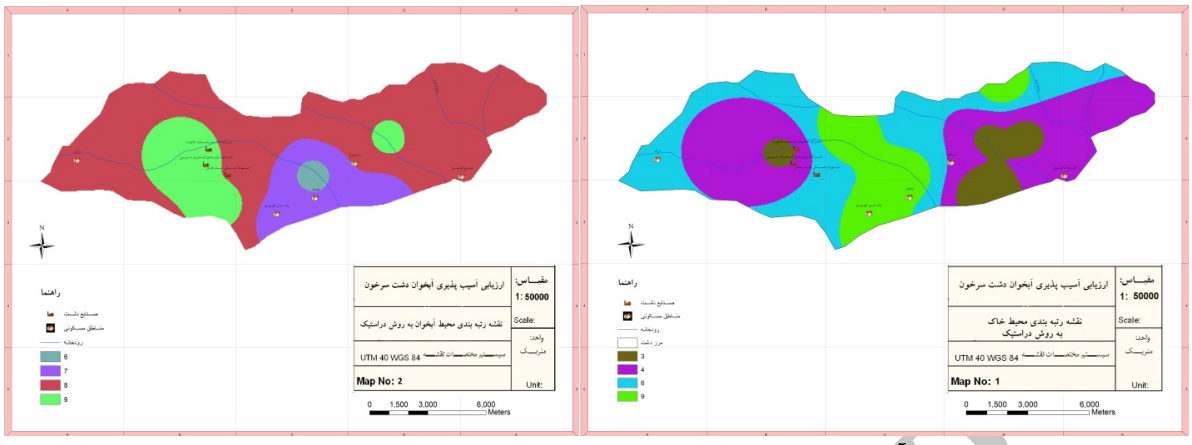



چ) شیب به روش دراستیک معمولی

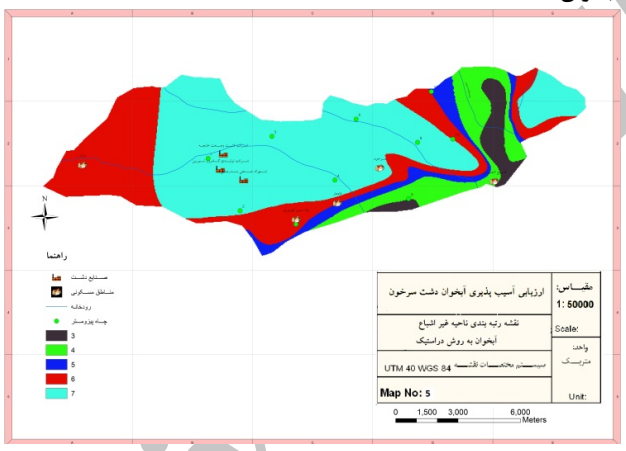



ح) شیب دراستیک فازی

www.SID.ir

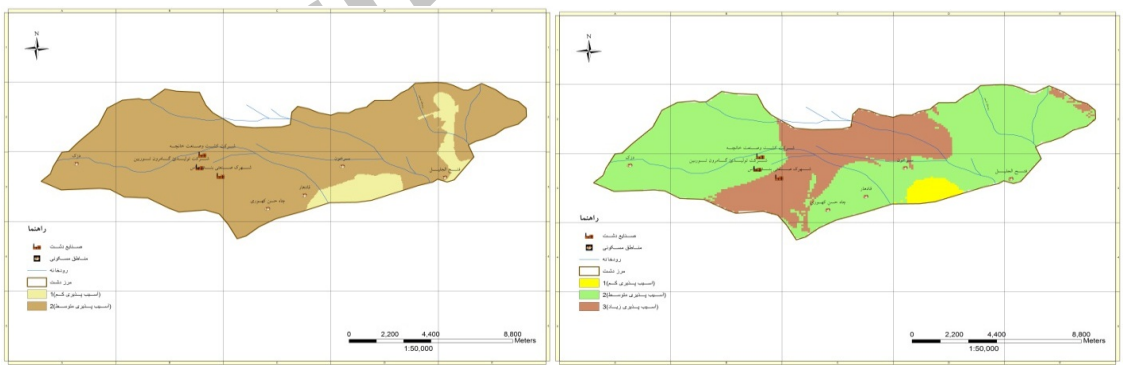



د) محیط خاک　　خ) محیط آبخوان




ذ) ناحیهٔ غیراشباع

**شکل ۴. نقشهٔ رتبه‌دهی پارامترهای دراستیک معمولی و فازی**



**شکل ۵. نقشهٔ دراستیک فازی (سمت راست) و معمولی (سمت چپ)**

مطابق نقشه‌های خروجی بالا، در منطق بولین که اساس روش دراستیک است بسیاری از مناطق آسیب‌پذیر با پتانسیل خیلی کم و خیلی زیاد نادیده گرفته شده‌اند که این مناطق در منطق فازی به حساب آمده و حائز درصدی واقعی و مناسب از آسیب‌پذیری شده‌اند.

آنچه از نقشهٔ پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت سرخون به روش دراستیک فازی مشاهده می‌شود این است که شاخص آسیب‌پذیری ذاتی منطقه بین ۷۰ تا ۱۲۷ قرار دارد که در ۲ طبقهٔ آسیب‌پذیری کم و متوسط قرار می‌گیرد. ۷/۸ درصد منطقه دارای آسیب‌پذیری کم و ۹۲/۲ درصد دارای آسیب‌پذیری متوسط است (شکل ۵).

www.SID.ir

### ۳. ۳. صحت‌سنجی مدل

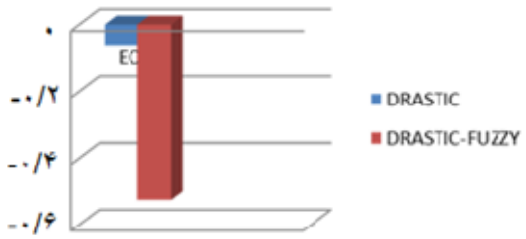
با توجه به برداشت‌های بیش از اندازه و خشکسالی اخیر در منطقهٔ مورد مطالعه بیلان دشت منفی شده و رودخانهٔ شور که از کیفیت ذاتی نامناسبی برخوردار است عملاً دشت را تغذیه می‌کند. این امر سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه شده به طوری که محدودهٔ پارامتر هدایت الکتریکی از غرب به شرق بین ۶۸۲ تا ۶۲۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر است (Water affairs study office of Hormozgan province, 2010).

به منظور صحت‌سنجی مدل دراستیک فازی و معمولی از عامل شوری که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار روی کیفیت آبخوان منطقهٔ مورد مطالعه است، به‌منزلهٔ شاخص آلایندگی استفاده شد.

از ضریب همبستگی اسپیرمن برای همبستگی مدل‌های دراستیک فازی و معمولی با داده‌های EC بر اساس ۲۴ نمونهٔ اندازه‌گیری‌شده با میانگین ۱۰ سالهٔ آماری استفاده شد (Moshaver yekom, 2012). جدول ۲ ضریب همبستگی مدل‌های آسیب و لایهٔ EC را نشان می‌دهد. هرچه کیفیت آب بیشتر باشد آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در مقابل آلوده‌کننده‌ها بیشتر خواهد شد که منفی‌شدن ضریب همبستگی نیز مؤید همین مطلب است. همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد ضریب همبستگی در مدل دراستیک فازی ۰/۵۲۶- و معمولی ۰/۰۶۶- است. در مدل دراستیک فازی در مقابل آسیب‌پذیری بیشتر EC کمتری خواهیم داشت که این امر صحت فازی را می‌رساند و می‌توان نتیجه گرفت مدل فازی دراستیک از دقت و صحت بالاتری نسبت به دارستیک معمولی برخوردار است (شکل ۶).

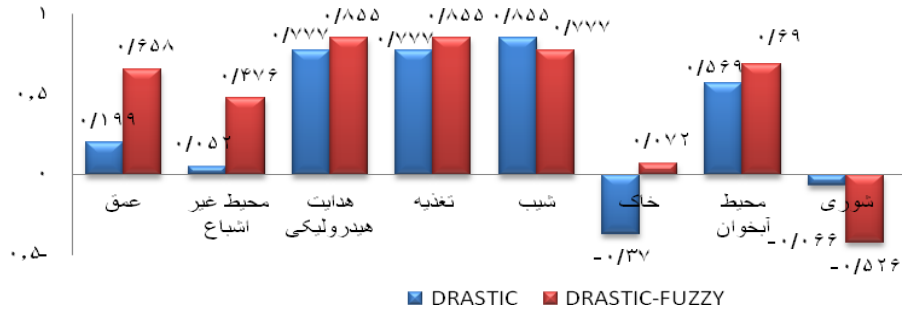
**جدول ۲. ضریب همبستگی مدل‌ها و عامل EC**

| پارامتر | EC |
|---|---|
| DRASTIC | ۰/۰۶۶- |
| DRASTIC-FUZZY | ۰/۵۲۶- |




**شکل ۶. نمودار همبستگی مدل‌های دراستیک و عامل EC**

همچنین، به منظور همبستگی بین پارامترها و مدل‌های فازی و دراستیک معمولی نیز از ضریب اسپیرمن استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۳ و شکل ۷ مشاهده می‌شود همبستگی پارامترهای عمق، هدایت هیدرولیکی، تغذیه، شیب و محیط آبخوان در سطح معنی‌دار ۵ درصد به ترتیب ۶۵، ۸۵، ۸۵، ۸۵ و ۶۹ درصدند که همبستگی بالایی را نشان می‌دهند و می‌توان صحت نتایج دراستیک فازی را تا حدود زیادی تأیید کرد.




**شکل ۷. نمودار همبستگی فاکتورها و دراستیک معمولی و فازی**

Archive of SID
www.SID.ir

**جدول ۳. ضریب همبستگی فاکتورها و مدل‌های دراستیک**

| پارامتر | عمق | محیط غیراشباع | هدایت هیدرولیکی | تغذیه | شیب | خاک | محیط آبخوان | شوری |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DRASTIC | ۰/۱۹۹ | ۰/۰۵۲ | ۰/۷۷۷ | ۰/۷۷۷ | ۰/۸۵۵ | -۰/۳۷ | ۰/۵۶۹ | -۰/۰۶۶ |
| DRASTIC-FUZZY | *۰/۶۵۸ | ۰/۴۷۶ | *۰/۸۵۵ | *۰/۸۵۵ | *۰/۷۷۷ | ۰/۰۷۲ | *۰/۶۹ | *۰/۵۲۶ |

* معنی‌داربودن در سطح ۵ درصد ($P< 0/05$)

## ۴. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش مقایسهٔ شاخص دراستیک و مدل فازی به منظور انتخاب شاخص مناسب‌تر برای تهیهٔ نقشهٔ آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت سرخون (استان هرمزگان) است. با توجه به اینکه تلفیق لایه‌ها در روش دراستیک با منطق بولین انجام می‌گیرد، در مقادیر مرزی خطا ایجاد شده و تغییر جزئی در مقادیر عوامل موجب جابه‌جایی از یک طبقه به طبقه دیگر می‌شود که توجیه‌پذیر است (استفاده از منطق فازی سبب افزایش دقت نتایج ویژه در مقادیر مرزی می‌شود). در این پژوهش در گام نخست لایه‌های هر کدام از پارامترهای مدل دراستیک (عمق، تغذیه، محیط آبخوان، خاک، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی) در محیط نرم‌افزار ARC GIS ساخته شد. در گام دوم همان‌طور که ذکر شد، با توجه به ماهیت طیفی و دامنه‌داربودن سیستم رتبه‌دهی مدل دراستیک که سبب بی‌دقتی و بی‌اطمینانی به ویژه در مقادیر مرزی می‌شود از تئوری فازی استفاده شد؛ بدین ترتیب که تمامی مراحل کار با استفاده از عملگر فازی نرم‌افزار MATLAB صورت گرفت. در نهایت به منظور مقایسهٔ مدل فازی و دراستیک معمولی از عامل EC به‌منزلهٔ شاخص آلایندگی منطقهٔ مورد مطالعه برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد. بدین منظور از رابطهٔ اسپیرمن برای بررسی همبستگی استفاده شد.

کیفیت آب زیرزمینی از طریق میزان قابل شرب‌بودن تعیین می‌شود. هرچه کیفیت آب بیشتر باشد آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در مقابل آلوده‌کننده بیشتر خواهد شد. ضریب اسپیرمن بین EC و دراستیک (۰/۰۶-) و مدل فازی دراستیک و EC (۰/۵۲۶-) همچنین، نتایج همبستگی مدل فازی و دراستیک با پارامترهای استفاده‌شده نشان داد که بین پارامترها و مدل فازی همبستگی بیشتری وجود دارد، به طوری که پارامترهای عمق، هدایت هیدرولیکی، تغذیه، شیب و محیط آبخوان در سطح ۵ درصد ارتباط معناداری با مدل فازی دارند که نتایج حاصل از منفی‌شدن ضریب اسپیرمن نیز مؤید همین مطلب است.

در نهایت از مدل فازی به‌منزلهٔ گزینهٔ برتر آسیب‌پذیری ذاتی منطقهٔ مورد مطالعه استفاده شد که در دو طبقهٔ آسیب‌پذیری کم ۷/۸ درصد و آسیب‌پذیری متوسط ۹۲/۲ درصد قرار دارد. به طور کلی، نتایج این تحقیق توانایی مدل‌سازی فازی پارامترهای هیدروژئولوژیک که از قطعیت ذاتی ندارند را تأیید می‌کند.

## یادداشت

1. DIRE DAW

## منابع

۱. مهندسان مشاور یکم. ۱۳۹۰. مطالعات طرح شناسایی و پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت سرخون، جلد سوم گزارش کیفیت و آلودگی آب‌های زیرزمینی.

2. Aller, L., Bennet, T., Lehr, JH., Petty. RJ. and Hackett, G. 1987 DRASTIC: a standardized system for evaluating

Archive of SID
www.SID.ir

groundwater pollution potential using hydro geological settings. EPA/600/2–87/035. US Environmental Protection Agency, Ada, OK, USA.

3. Anonymous, P., 1993. A Methodology and Decision Support System for Evaluating The Leaching Potential of Pesticides, U.S. Environmental Protection Agency, EPA, 600/S – 93/010.

4. Dixon, B., Scott, H. D., Steele, K. F. and Dixon, J. C. 2002. Prediction of aquifer vulnerability to pesticides using fuzzy rule-based models at the regional scale. *Physical Geography*, 23(2): pp. 130-153.

5. Focazio, J.M., Reilly, E.T., Rupert, G.H. and Helset, R.D. 2002. Assessing groundwater vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4273, 33 p.

6. Ketema Tilahun ., Broder J. Merkel., "Assessment of groundwater vulnerability to pollutionin Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC" Environ Earth Sci .2010. 59:1485–1496

7. Malano, H.M. and Gao, G. 1992**.** Ranking and Classification of irrigation system performance using fuzzy set theory: case studies in Australia and China. Irrigation and Drainage Systems, (6)**:** pp.129-148.

8. 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 (In Persian).

9. Toranjian, A. 2009. Investigation of vulnerable locations to pollution in Hamedan-Bahar aquifer using GIS. MSc Thesis, Faculty of Agriculture, Department of water engineering , Bu-Ali Sina University (In Persian).

10. Water affairs study office of Hormozgan province. 2010. Exploitation development prevention extension explanation report in the Sarkhon plain groundwater resources. Water affairs total office of Hormozgan province (In Persian).

Archive of SID

www.SID.ir