

بهینه‌سازی مدل DRASTIC جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی آبخوان کاشان به آلودگی نترات با استفاده از روش‌های آماری و تحلیل حساسیت

جواد صمدی^(۱)

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع طبیعی- آلودگی‌های محیط‌زیست،
دانشگاه شهیدبهشتی تهران.

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۲۹

چکیده

در این تحقیق از بهینه‌سازی پارامترهای مدل DRASTIC و لایه کاربری اراضی (LU) جهت ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آبخوان کاشان با استفاده از روش‌های آماری استفاده گردیده است. لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS تهیه، رتبه‌بندی (قطعی و فازی-آماري)، وزن‌دهی (اصلي و آماری) و به‌روش هم‌پوشانی شاخص تلفیق گردیدند. برای بهینه‌سازی مدل DRASTIC، از رگرسیون غیرخطی جهت رتبه‌بندی فازی-آماري (هم‌مقیاس‌سازی) و از ضرایب همبستگی پیرسونی بین غلظت نترات با پارامترهای هم‌مقیاس‌شده مدل DRASTIC و تحلیل حساسیت (حذف پارامتری و تک پارامتری) جهت تعیین و تصحیح وزن مناسب پارامترها استفاده شد. در نتیجه مدل RASIC-LU براساس رتبه‌بندی و وزن‌دهی آماری و تحلیل حساسیت تک پارامتری، ضریب همبستگی ۶۱/۱ درصد و سطح معنی‌داری آماری ۰/۰۰۱ را نشان داده و با پارامترهای نرخ تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، اثر منطقه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی و کاربری اراضی به‌ترتیب با وزن‌های ۲/۵۰، ۴/۶۳، ۴/۱۵، ۳/۰۳، ۱/۹۶، ۲/۰۰ به‌عنوان بهترین مدل انتخابی مشخص شد. براساس این مدل، قسمت‌های غربی و جنوبی آبخوان به‌دلیل نرخ تغذیه بالا، کاربری اراضی آلاینده و مواد درشت‌دانه در ناحیه غیراشباع، خاک و محیط آبخوان دارای خطرپذیری آلودگی زیاد و بسیار زیاد می‌باشد. همچنین حساسیت این مدل براساس میانگین مجذورات خطا (MSE) نسبت به حذف و یا افزایش وزن پارامترهای کاربری اراضی، محیط خاک، اثر منطقه غیراشباع، محیط آبخوان، نرخ تغذیه خالص و هدایت هیدرولیکی به‌ترتیب روند کاهشی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری ویژه، RASIC-LU، DRASTIC، آبخوان کاشان، ضریب همبستگی، تحلیل حساسیت.

مقدمه

ارزیابی آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان برای مدیریت، توسعه و تخصیص کاربری اراضی، نحوه پایش کیفیت، پیش‌گیری و حفاظت از آلودگی آب‌های زیرزمینی ضروری است (صمدی، ۱۳۹۴a). آسیب‌پذیری تمایل آلودگی آب‌های زیرزمینی و یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها از سطح زمین به آب زیرزمینی و انتشار آلاینده در آبخوان تعریف می‌گردد. آسیب‌پذیری یک مفهوم کیفی و خصوصیتی نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری می‌باشد و باید از اطلاعات دیگری که قابل اندازه‌گیری هستند (زمین‌شناسی و خصوصیت آبخوان) نتیجه‌گیری شود (Vrba and Zaporozec, 1994). به آسیب‌پذیری وابسته به آلودگی یا آسیب‌پذیری مختص به کاربری اراضی معین آسیب‌پذیری ویژه^۱ می‌گویند (Harter and Wiker, 2001). همچنین احتمال میزان آلودگی آب زیرزمینی به ازاء میزان نوع مشخصی از آلودگی در سطح کاربری زمین نیز تعریف می‌شود (صمدی، ۱۳۹۴a). یکی از روش‌هایی که برای برآورد آسیب‌پذیری استفاده می‌گردد، روش‌های آماری می‌باشد. بدین نحو که غلظت آلاینده و یا احتمال آلودگی به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده و با توجه به توزیع مکانی آلاینده و ارتباط آن با شرایط محیطی که ممکن است بر آسیب‌پذیری موثر باشد، پتانسیل آلودگی در منطقه مورد نظر ترسیم می‌شود. روش‌های آماری براساس ویژگی عدم قطعیت استوار هستند که به‌صورت قاعده‌های توزیع احتمالی متغیرهای دلخواه بیان می‌شوند و در رابطه با انواع داده‌های بهم پیوسته از انعطاف بیشتری برخوردارند (Evans and Maidment, 1995; Lindstrom, 2005).

پژوهش‌هایی توسط Panagopoulos et al. (2006) در آبخوان جنوب غربی تریفیلیای^۲ یونان، محمدی و همکاران (۱۳۸۷) در آبخوان آستانه - کوچصفهان و طیبیان (۱۳۹۰) در آبخوان دشت رفسنجان که با استفاده از روش‌های آماری ساده انجام شد، وزن پارامترهای مدل DRASTIC را براساس خطرپذیری ذاتی پارامترها (سطح معنی‌داری و میزان همبستگی) به نیترا و رتبه پارامترها را براساس میانگین نیترا مشاهده‌شده اصلاح و بهینه کرده و میزان

همبستگی نقشه نهایی آسیب‌پذیری با نیترا را افزایش دادند. متکان و همکاران (۱۳۸۷) در پژوهشی وزن پارامترهای مدل DRASTIC را براساس روش AHP و تعیین همبستگی اسپیرمن و کندال هر پارامتر با نیترا و رتبه پارامترها را براساس دو روش قطعی و فازی تصحیح کرده و میزان همبستگی نقشه نهایی آسیب‌پذیری با نیترا در آبخوان دشت همدان - بهار را به ۰/۷۸ افزایش دادند. احمدی و آبرومند (۱۳۸۸) در پژوهشی با انجام آنالیزهای آماری براساس یون نیترا و تحلیل حساسیت مشخص کرد که مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری آبخوان خاش، تغذیه خالص می‌باشد. (Javadi et al. 2011). در پژوهشی، وزن پارامترهای مدل DRASTIC را براساس تحلیل حساسیت و رتبه پارامترها را براساس میانگین نیترا مشاهده‌شده اصلاح و بهینه کرده و میزان همبستگی نقشه نهایی آسیب‌پذیری با نیترا را در آبخوان آستانه گیلان به ۰/۸۴ افزایش دادند. (Sorichetta et al. 2011). در پژوهشی اعتبارسنجی نقشه‌های آسیب‌پذیری بدست‌آمده میلان ایتالیا را با استفاده از روش‌های آماری مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از تکنیک مدل‌سازی WoE^3 جهت تولید خروجی‌های شش مدل هرکدام با تعداد متفاوتی از فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده ورودی استفاده کردند. با توجه به اینکه نقشه‌ها معنی‌دار هستند از شاخص آماری کاپا و تکنیک‌های اعتبارسنجی جهت توافق مکانی و طبقه‌بندی مجدد استفاده شده بود. نتایج نشان داد که عملکرد مدل به تعدادی از عوامل پیش‌بینی‌کننده ورودی مستقیم مربوط است و به محدود شدن تعداد گزینه‌های احتمالی می‌انجامد. (Hentati et al. 2011). در پژوهشی، همبستگی ۰/۵۵ غلظت نیترا چاه‌ها و ضریب تشخیص ۰/۸۸ رگرسیون نیترا با شاخص آسیب‌پذیری را براساس مدل DRASTIC و روش آماری در آبخوان حوضه اسفاکس - آگاربا^۴ تونس بدست آوردند. (Krishna et al. 2014) با استفاده از تحلیل حساسیت

1. Specific vulnerability
2. Trifilia
3. Weights of Evidence
4. Sfax-Agareb

مرکزی ایران و در حدود ۲۴۰ کیلومتری جنوب تهران به صورت دره‌ای باریک، با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی با عرضی در حدود ۲۰ کیلومتر واقع می‌باشد که در شمال به دشت قم، در جنوب به ارتفاعات مجاور منطقه نطنز، از غرب به ارتفاعات و از شرق به محدوده دریاچه نمک منتهی می‌شود و بین طول‌های جغرافیایی ۵۴° ۵۱' تا ۵۱° ۰۵' و عرض‌های ۴۵' ۳۳° تا ۲۳' ۳۴° محدود می‌باشد. آبخوان کاشان به وسعت ۱۸۳۰ km³ (شکل ۱)، شهر کاشان و بخش مرکزی آن، شهر آران و بیدگل و همه بخش‌های آن و اراضی کشاورزی واقع در دشت را شامل می‌شود. تقریباً تمام بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی کاشان نیز در همین محدوده صورت می‌گیرد. حداکثر ارتفاع آبخوان از سطح دریا ۱۶۰۲ متر در حاشیه جنوب غربی و حداقل ارتفاع آن ۸۰۰ متر در حاشیه شمالی آبخوان می‌باشد (صمدی، ۱۳۹۴ a).

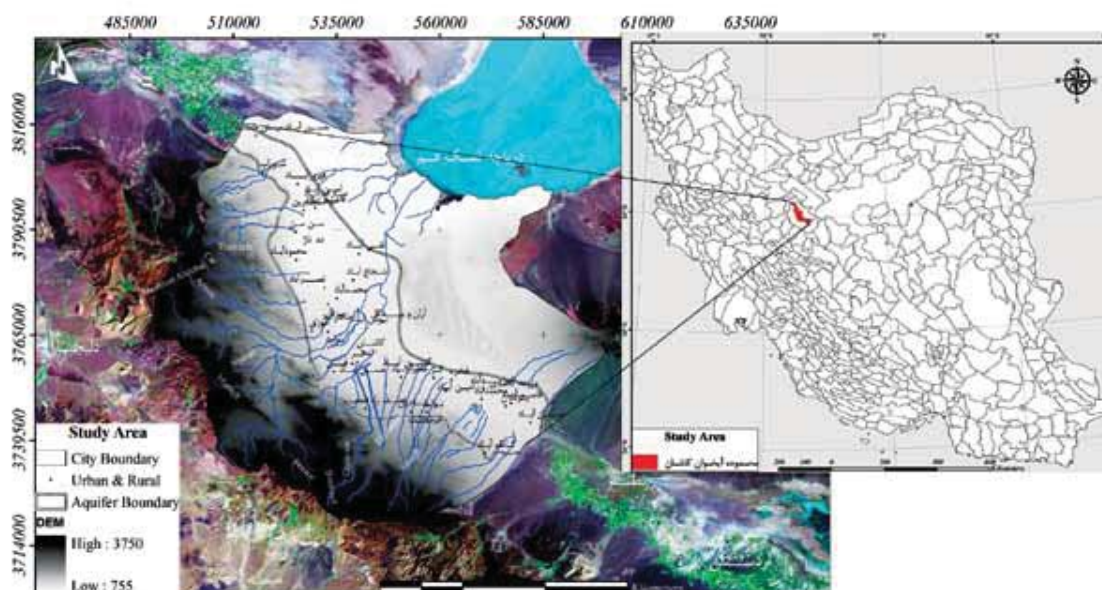
تک پارامتری و مقادیر نیترا مشاهده شده در آبخوان رانچی^۱ هند، وزن و رتبه پارامترهای مدل DRASTIC را جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری اصلاح کردند.

هدف و نوع‌آوری این پژوهش استفاده از روش‌های آماری (رگرسیون غیرخطی^۲) جهت فازی‌سازی و رتبه‌بندی فازی-آماری پارامترهای آسیب‌پذیری و نیز استفاده از ضریب همبستگی آن با نیترا و تحلیل حساسیت جهت وزن‌دهی و بهینه‌سازی مدل نهایی آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد. با توجه به اینکه در بازبینی وزن پارامترهای مدل DRASTIC به روش آماری تا حدودی نظرات شخصی محدود می‌گردد. می‌توان انتظار داشت که این روش نتایج مطلوبی برای بهینه‌سازی مدل به دنبال داشته باشد.

مواد و روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

دشت کاشان در دامنه کوه‌های کرکس و حاشیه کویر



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه آبخوان کاشان (صمدی، ۱۳۹۴ b)

مدل DRASTIC

DRASTIC مخفف پارامترهای عمق برخورد به سطح آب ایستابی^۱ (فاصله بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی)، نرخ تغذیه خالص^۲ (مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ نموده و به سطح ایستابی می‌رسد، R)، مواد تشکیل‌دهنده یا محیط آبخوان^۳ (جنس و مواد تشکیل‌یافته در منطقه اشباع آب زیرزمینی، A)، محیط خاک^۴ (بافت و ساختمان تشکیل‌دهنده جنس و اندازه خاک، S)، توپوگرافی^۵ (شیب و تغییرات سطح زمین، T)، اثر منطقه غیراشباع^۶ (جنس و مواد تشکیل‌یافته در منطقه بالای سطح آب ایستابی، I)، هدایت هیدرولیکی^۷ (حجم آب عبوری در منطقه اشباع در واحد زمان و تحت شیب هیدرولیکی از میانی سطحی واحد و عمود بر جهت جریان، C) است که در یک سیستم هیدروژئولوژیکی کنترل‌کننده آلودگی آب زیرزمینی می‌باشند و اولین بار در آژانس حفاظت محیط‌زیست EPA آمریکا برای استاندارد نمودن سیستمی تهیه شد که آسیب‌پذیری آب زیرزمینی را نسبت به آلودگی مورد ارزیابی قرار می‌داد (Aller et al., 1987). این مدل یک نمایه نسبی و بدون بعد می‌باشد و براساس چهار فرضیه پایه‌گذاری شده است (Rosen, 1994):

۱- آلودگی در سطح زمین تولید می‌گردد، ۲- آلودگی از طریق نفوذ به آب زیرزمینی منتقل می‌گردد، ۳- عامل حرکت آلوده‌کننده آب است، ۴- منطقه مورد مطالعه در مدل DRASTIC بایستی بزرگتر از ۰/۴ کیلومتر مربع (۴۰ هکتار) باشد.

در این روش برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی از شاخص آسیب‌پذیری طبق رابطه (۱) استفاده گردید که برای بدست آوردن آن به سه عامل درجه‌بندی و محدوده (جهت هم‌مقیاس‌سازی) و وزن‌دهی پارامترهای هفت‌گانه مدل DRASTIC نیاز است.

$$V_{DRASTIC\ Index} = D_r * D_w + R_r * R_w + A_r * A_w + S_r * S_w + T_r * T_w + I_r * I_w + C_r * C_w \quad (1)$$

در این رابطه، r رتبه و w وزن هریک از پارامترهاست (Aller et al., 1987).

هم‌مقیاس‌سازی^۸ و رویه هم‌گذاری پارامترها

جهت هم‌مقیاس‌سازی با توجه به دانش کارشناسی و با استفاده از تابع طبقه‌بندی مجدد، تمام نقشه‌های معیار مربوط به روش DRASTIC طبق شکل (۲) به دو روش قطعی و آماری رتبه‌بندی گردید. در روش قطعی، مرز بالا و پایین طبقات یک کد براساس رتبه جداول مربوط به مدل بین ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شد (مقدار ۱۰ نواحی با بیشترین آسیب‌پذیری، در حالی که مقدار ۱ نواحی با کمترین آسیب‌پذیری براساس آن پارامتر است). در این تحقیق از رگرسیون غیرخطی جهت فازی‌سازی و رتبه‌بندی فازی-آماري پارامترها استفاده شد. در این عمل سعی شد بهترین خط رگرسیون براساس رتبه و مقدار بازه هریک از پارامترهای آسیب‌پذیری انجام شود. در مرحله بعدی نقشه‌های معیار در رابطه‌های (۴)، (۵)، (۶)، (۷) و (۸) بدست‌آمده از این خط رگرسیون در شکل (۲) قرار داده شده و لایه‌های معیار پارامترهای مدل آسیب‌پذیری بر این اساس هم‌مقیاس شدند. از این نقشه‌ها برای تعیین میزان همبستگی و وزن‌دهی و از مجموع آنها برای تعیین مقدار و میزان آسیب‌پذیری استفاده گردید. با توجه به اینکه شرایط هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی در مناطق مختلف متفاوت می‌باشد، لایه‌های مدل DRASTIC می‌بایست متناسب با وضعیت هر منطقه ولی با در نظر گرفتن مبانی ارائه‌شده مربوط به مدل تصحیح شوند. به جز لایه‌های کیفی که براساس روند، اندازه و نوع جنس و لایه کاربری اراضی براساس میزان نیترات و آسیب‌پذیری موجود در هر کاربری بین ۱ تا ۱۰ رتبه‌بندی شدند. دیگر لایه‌های مورد نیاز برای آبخوان کاشان هیچ‌گونه تغییری نیافته و براساس مقادیر بازه و رتبه‌های جداول مربوط به مدل رتبه‌بندی گردید. براساس تئوری مدل به هریک از پارامترهای هفت‌گانه DRASTIC و نسبت به اهمیت هریک از آنها وزنی برابر با ۱ تا ۵ داده شد. به طوری که به مهم‌ترین آنها وزن ۵ و به کم‌اهمیت‌ترین آنها وزن ۱ داده شد.

1. Depth to water table
2. Net recharge
3. Aquifer media
4. Soil media
5. Topography
6. Impact of vadose zone
7. Hydraulic conductivity
8. Scaling

طریق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد (Lodwick et al., 1990).

$$S = \left(\frac{\frac{V - V'}{N - n}}{V} \right) * 100 \quad (۲)$$

در این رابطه S میزان حساسیت پارامتر V شاخص آسیب‌پذیری، V شاخص آسیب‌پذیری هنگام حذف پارامتر مورد نظر، N تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبه V و n تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبه V هستند.

روش تحلیل حساسیت تک پارامتری، اثر هر کدام از پارامترهای DRASTIC بر روی شاخص آسیب‌پذیری را بررسی می‌کند. این تحلیل حساسیت برای مقایسه وزن واقعی هر کدام از پارامترها با وزن تئوریک در مدل تحلیلی انجام می‌شود. وزن پارامتر موثر از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد (Napolitano and Fabbri, 1996).

$$W = \left(\frac{P_r * P_w}{V} \right) * 100 \quad (۳)$$

که P پارامتر مورد نظر، W وزن پارامتر موثر، r رتبه پارامتر موثر و V شاخص کلی آسیب‌پذیری است.

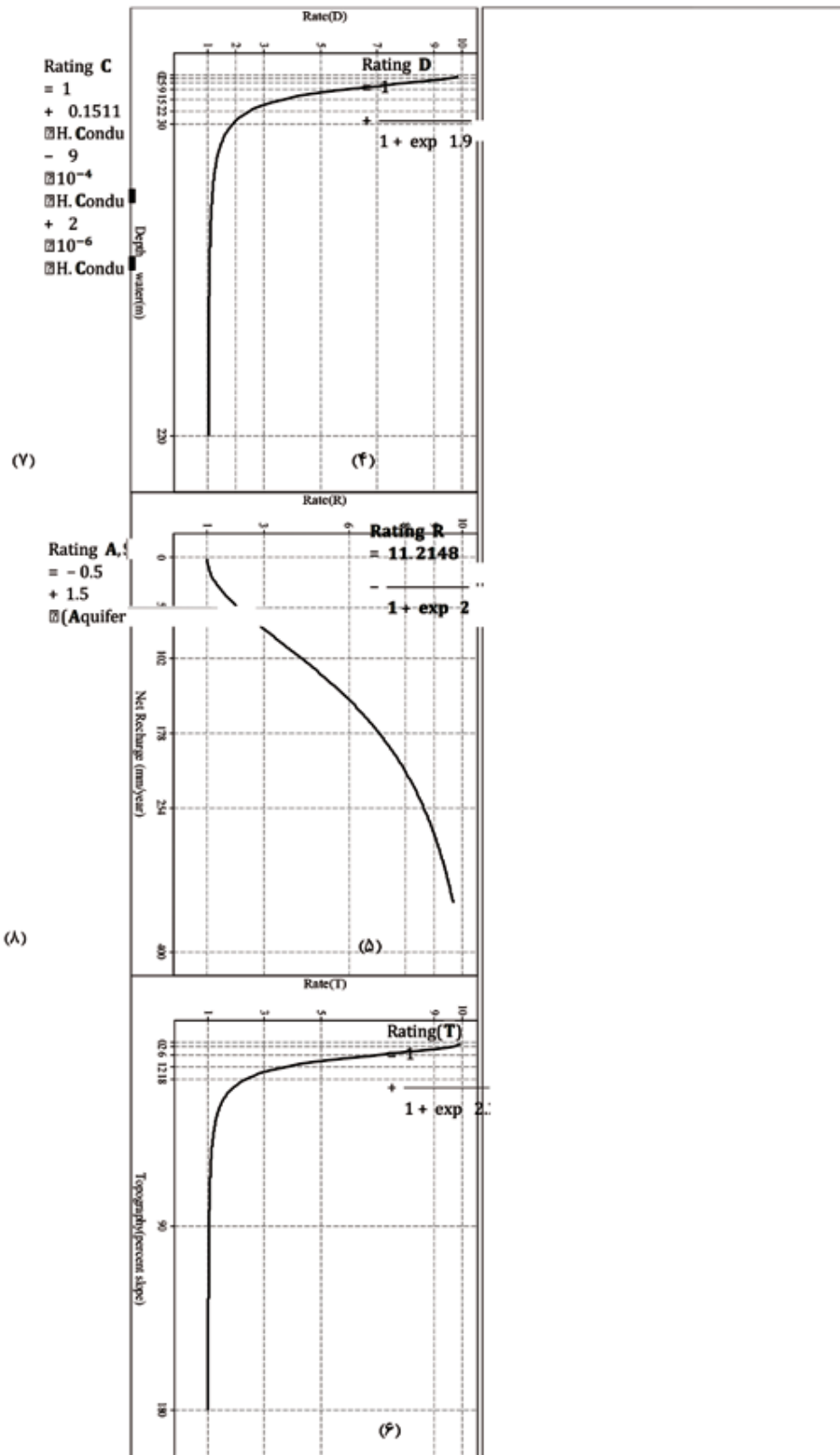
بهینه‌سازی

در این تحقیق، جهت بهینه‌سازی مدل ابتدا رتبه پارامترهای آسیب‌پذیری بر اساس روش آماری (رگرسیون غیرخطی) فازی شده سپس تصحیح وزن بر اساس ضریب همبستگی پیرسونی^۱ (Pearson, 1896) انجام گرفت. بر اساس تئوری، این مدل تصحیح شده و با اعمال رتبه‌بندی و وزن‌دهی مناسب، نقشه شاخص مدل منطقه تهیه گردید. از آنجایی‌که پارامترهای هیدروژئولوژی نسبت به یکدیگر دارای همبستگی معنی‌داری هستند، جهت وزن‌دهی مناسب پارامترها سعی شد پس از تعیین ضریب همبستگی از تحلیل حساسیت حذف پارامتر^۲، حساسیت تک پارامتری^۳ و میانگین مجذورات خطا^۴ جهت رسیدن به بهترین وزن، بیشترین همبستگی و سطح معنی‌داری بر طبق مدل مفهومی شکل ۳ استفاده گردد.

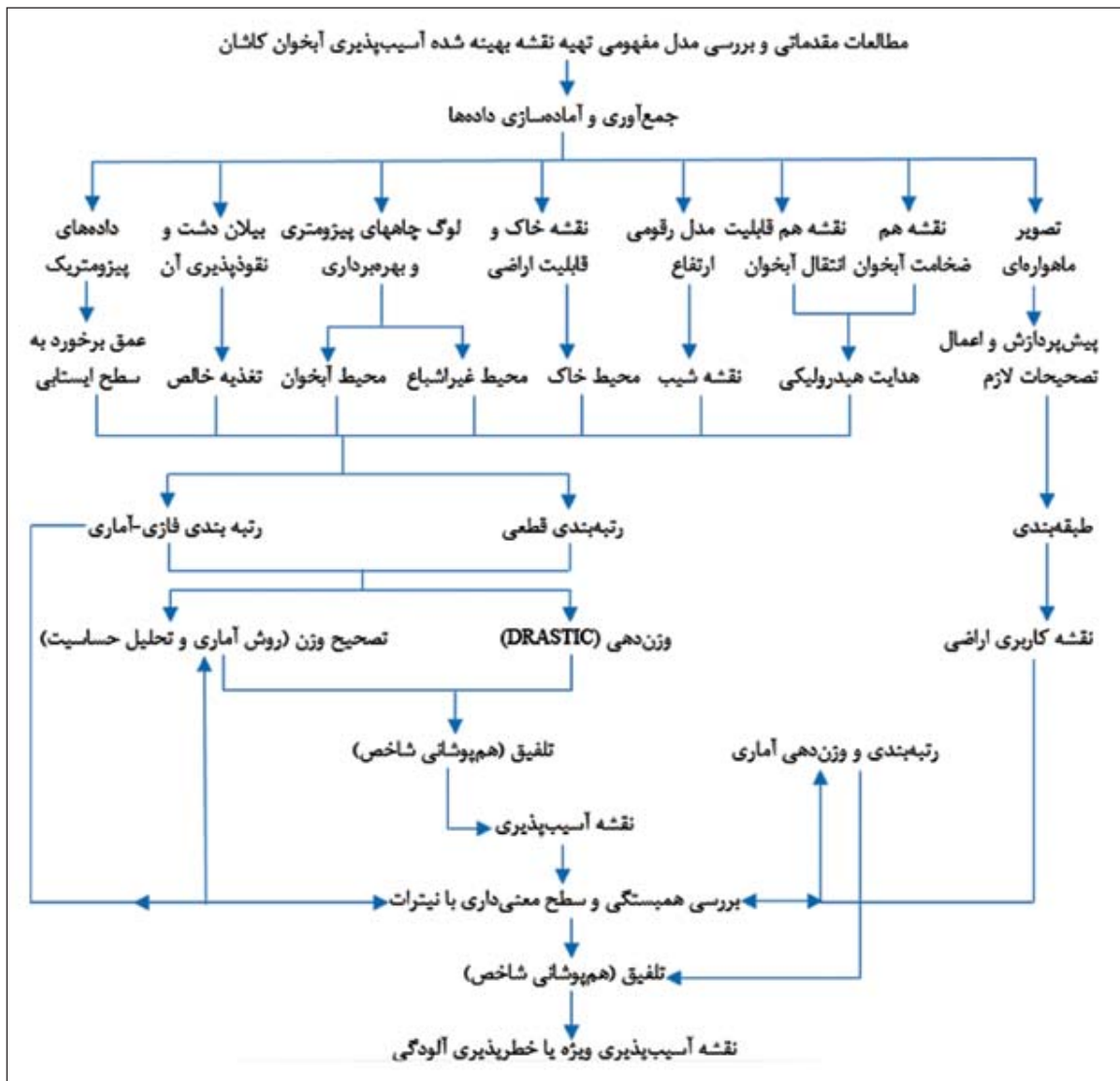
تحلیل حساسیت

برای آگاهی از میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترهای بکارگرفته‌شده در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مورد مطالعه، تحلیل حساسیت مدل تصحیح‌شده انجام گرفته است. برای انجام این کار از سه روش استفاده شد. روش تحلیل حساسیت حذف پارامتر، حساسیت نقشه آسیب‌پذیری را به حذف هر یک از پارامتر نشان می‌دهد و از

1. Pearson correlation
2. Removal-parameter sensitivity analysis
3. Single-parameter sensitivity analysis
4. Mean Squares Error



شکل ۲. بازه‌ها، وزن‌ها و رتبه‌بندی‌های قطعی (Aller et al., 1987) و فازی-آماری پارامترهای مدل DRASTIC



شکل ۳. مدل مفهومی بهینه‌سازی مدل DRASTIC با استفاده از روش‌های آماری جهت تعیین آسیب‌پذیری ویژه آبخوان کاشان

مدل تصحیح‌شده، شاخص آسیب‌پذیری با اعمال تغییر وزن در هرکدام از پارامترها، n تعداد پیکسل‌ها و MSE میانگین مجذورات خطا می‌باشد (Spitz and Moreno, 1996).

نتایج و بحث

شکل‌های (۲ و ۳) نحوه تهیه و شکل (۴) نقشه‌های رتبه‌بندی پارامترهای مدل DRASTIC را نشان می‌دهد. براساس لایه‌های بدست‌آمده پارامترهای عمق تا سطح آب زیرزمینی براساس درون‌یابی کریگینگ^۱ داده‌های پیژومتریک ۶۷ حلقه چاه (سازمان آب کاشان، ۱۳۹۰)، نرخ تغذیه خالص

1. Kriging

همچنین جهت تعیین میانگین مجذورات خطا برای تحلیل حساسیت مدل تصحیح‌شده از رابطه (۹) استفاده گردیده است. با محاسبه MSE برای پارامترهای مختلف نمودار حساسیت مدل به تغییر پارامترها تهیه گردیده است. برای تعیین حساسیت مدل نسبت به تغییرات وزن تک تک پارامترها، با عوض کردن وزن هر پارامتر، مدل‌های مختلف تهیه گردیده و میزان MSE طبق رابطه ۹ محاسبه گردید.

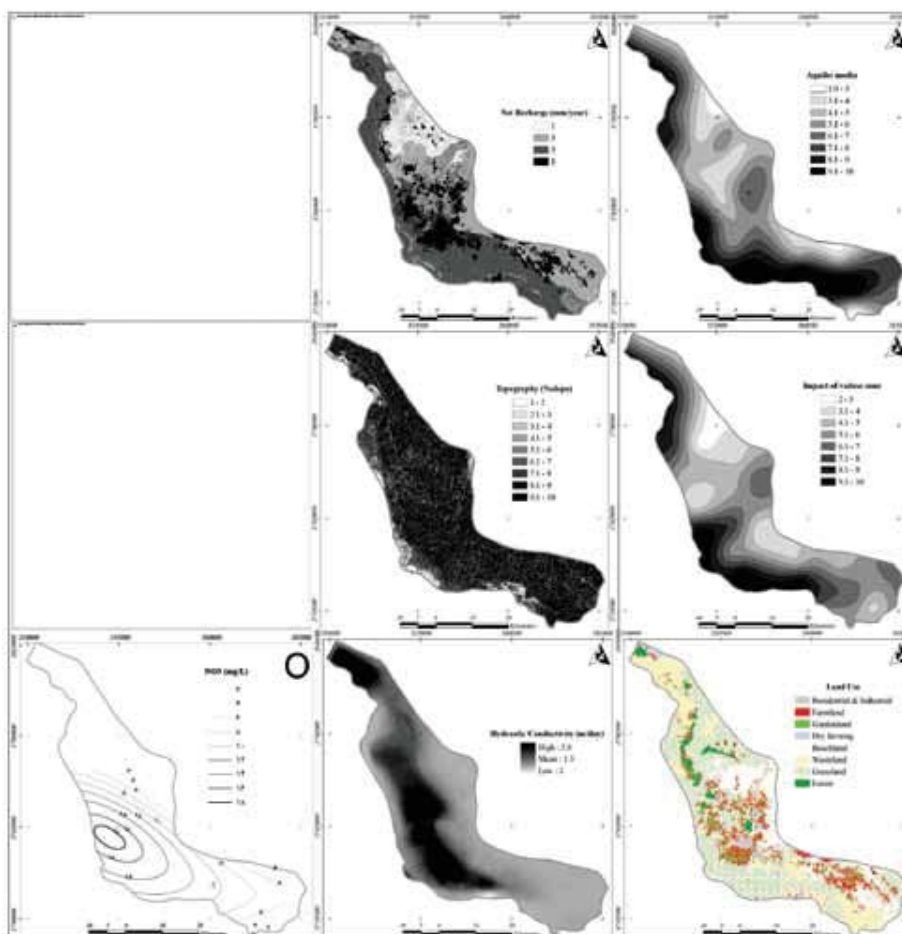
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{(x_i)} - Z^*_{(x_i)})^2 \quad (9)$$

در این رابطه شاخص آسیب‌پذیری با وزن اعمال شده در

نیترات از تابع تبدیل BOX-COX در نرم افزار ArcGIS استفاده و پهنه بندی گردید (صمدی، ۱۳۹۴). بعد از تهیه نیترات در شکل ۴ براساس میانگین فصلی ۱۳۰ ایستگاه نمونه برداری شرکت آب و فاضلاب کاشان در بازه سال های (۱۳۸۴-۱۳۹۱)، میزان همبستگی و وزن آن با دیگر پارامترهای آسیب پذیری هم مقیاس شده تعیین گردید (جدول ۱).

انتخاب شاخص آلودگی نیترات به دلایل زیر می باشد:
 ۱) نیترات به علت فعالیت های انسانی آلاینده اصلی و نشانه آلودگی و تخریب آبخوان می باشد (EPA, 1996).
 ۲) نیترات در آب حل شده و تا زمان رسیدن به آب زیرزمینی و پس از آن، غلظت آن تحت تأثیر عوامل هیدروژئولوژیک افزایش، کاهش (ترقیق) و پخش می شود (صمدی، ۱۳۹۴ a).

براساس روش (Piscopo (2001)، شیب توپوگرافی براساس مدل رقومی ارتفاع با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و هدایت هیدرولیکی براساس تقسیم میزان قابلیت انتقال آب (موسسه آب و خاک تهران، ۱۳۸۸) بر لایه ضخامت اشباع (براساس درون یابی نمونه ژئوفیزیکی) به ترتیب به طور متوسط ۷۲ متر، ۱۲۶ میلی متر بر سال، ۴/۱ درصد و ۳ متر بر روز بدست آمد که مقدار آن از غرب به شرق آبخوان کاهش می یابد. پارامترهای محیط آبخوان، اثر منطقه غیراشباع و محیط خاک (براساس درون یابی رتبه اندازه جنس ذرات ۴۰ لوگ حفاری و نقشه خاک و قابلیت اراضی)، به ترتیب بیشتر از جنس شنی و ماسه سنگ به همراه رس، شنی و ماسه سنگ به همراه رس، و لومی می باشد که اندازه آن از غرب (شنی) به شرق (رسی) آبخوان ریزدانه می شود (صمدی، ۱۳۹۴ a). جهت محاسبه ضریب همبستگی و تعیین تأثیر، فرض نرمال بودن داده ها الزامی است. برای نرمال کردن داده های



شکل ۴. نقشه های رتبه بندی پارامترهای مدل DRASTIC، لایه کاربری اراضی و نقشه متوسط آلودگی نیترات (NO_3^-) سال های ۸۴-۹۱ آبخوان کاشان

نتایج حاصل از بهینه‌سازی

با توجه به این که شیب توپوگرافی به‌طور مستقیم بر میزان تغذیه آبخوان موثر می‌باشد و نیز به‌دلیل این که با افزایش عمق سطح ایستابی میزان و آسیب‌پذیری پارامترهای نرخ تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، اثر منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی افزایش می‌یابد و همچنین به‌دلیل سطح ایستابی بالا (>۳۰ متر) در بیشتر آبخوان و نبود تغییرات قابل توجه در میزان نیترات نسبت به پارامترهای سطح ایستابی و شیب توپوگرافی، این دو پارامتر همبستگی مناسبی با نیترات ایجاد نکرده و نمی‌توان انتظار استفاده از آنها در مدل کالیبره‌شده آسیب‌پذیری آبخوان کاشان را داشت.

پارامترهایی که از همبستگی قابل قبولی با نیترات برخوردار نبودند از معادله مدل حذف شدند. بر این اساس هنگام استفاده از لایه‌های رتبه‌بندی‌شده قطعی و وزن‌دهی اصلی در مدل آسیب‌پذیری ویژه، همبستگی بین نیترات و شاخص آسیب‌پذیری به ۴۹ درصد رسید. در نقشه تهیه‌شده براساس رتبه‌بندی فازی-آماری و وزن‌دهی آماري لایه‌های آماري میزان همبستگی بین نیترات و نقشه خطرپذیری آلودگی در روش همبستگی پیرسونی در مدل RASIC-LU به ۵۶ درصد رسید. در این روش پارامترهای عمق تا سطح ایستابی و شیب توپوگرافی حذف شد.

جدول ۱. وزن‌دهی پارامترهای آسیب‌پذیری مدل DRASTIC براساس روش آماری و تحلیل حساسیت

آسیب‌پذیری	رتبه‌بندی قطعی و وزن‌دهی اصلی	رتبه‌بندی فازی-آماري و وزن‌دهی آماري	آنالیز حساسیت حذف پارامتری	آنالیز حساسیت تک پارامتری
عمق سطح ایستابی	۵	-۰/۷۰۹		
نرخ تغذیه خالص	۴	*	۲/۵۰	۱۸/۰۶
محیط آبخوان	۳	*	۴/۶۳	۲۴/۹۸
محیط خاک	۲	*	۴/۱۵	۲۴/۰۴
شیب توپوگرافی	۱	-۰/۰۵۰		
اثر منطقه	۵	*	۳/۰۳	۱۹/۴۹
هدایت هیدرولیکی	۳	*	۱/۹۶	۶/۹۷
کاربری اراضی	۵	*	۲	۶/۴۳
Pearsonian Correlation	۴۹	۵۶	۶۱/۱	۶۰/۰۴
P-Value	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵

* P-Value < 0.05، P-Value سطح معنی‌داری آماری می‌باشد.

به جدول ۱ در تحلیل حساسیت به‌روش حذف پارامتر، شاخص آسیب‌پذیری بیشترین حساسیت را به پارامتر محیط آبخوان و محیط خاک نشان می‌دهد و پارامتر اثر منطقه غیراشباع، نرخ تغذیه خالص، هدایت هیدرولیکی و کاربری اراضی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. بر این اساس مدل حاصله RASIC-LU همبستگی ۶۰/۰۴ درصد را با نیترات نشان داد.

نتایج حاصل از میانگین مجذورات خطا: با محاسبه MSE برای پارامترهای مدل RASIC-LU در شکل ۵ مشخص شد که حساسیت مدل نسبت به حذف، افزایش و کاهش وزن پارامترهای کاربری اراضی، محیط خاک، اثر

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت تک پارامتری: براساس نتایج بدست‌آمده این تحلیل در جدول ۱، بیشترین حساسیت در شاخص آسیب‌پذیری RASIC-LU در حذف پارامتر محیط آبخوان و محیط خاک مشاهده می‌گردد. حساسیت شاخص آسیب‌پذیری به حذف پارامتر اثر منطقه غیراشباع، نرخ تغذیه خالص، کاربری اراضی و هدایت هیدرولیکی در رتبه‌های سوم تا ششم می‌باشد.

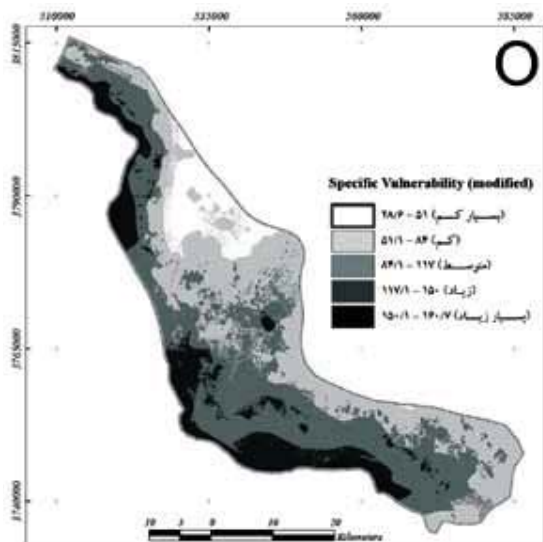
با توجه به اینکه دو پارامتر عمق تا سطح ایستابی و شیب توپوگرافی تأثیر منفی نشان داد، از مدل حذف شد و مدل حاصله همبستگی ۶۱/۱ درصد را با نیترات نشان داد.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف پارامتر: با توجه

بر این اساس مدل RASIC-LU طبق رابطه ۱۰ با رتبه‌بندی و وزن‌دهی آماری و تحلیل حساسیت تک پارامتری و با ضریب همبستگی ۰/۶۱ درصد به‌عنوان بهترین مدل شناخته شد و نقشه آن در شکل (۶) تهیه گردید.

$$V_{\text{Specific vulnerability}} = 2.5 * R + 4.63 * A + 4.15 * S + 3.03 * I + 1.96 * C + 2 * LU \quad (10)$$

براساس نقشه حاصل از مدل RASIC-LU، حدود ۱ درصد از آبخوان در قسمت‌های غربی و جنوبی به‌دلیل نرخ تغذیه بالا، مواد درشت‌دانه در ناحیه غیراشباع، محیط خاک و محیط آبخوان و وجود کاربری‌های شهری، صنعتی و کشاورزی دارای خطرپذیری آلودگی بسیار زیادی می‌باشد.

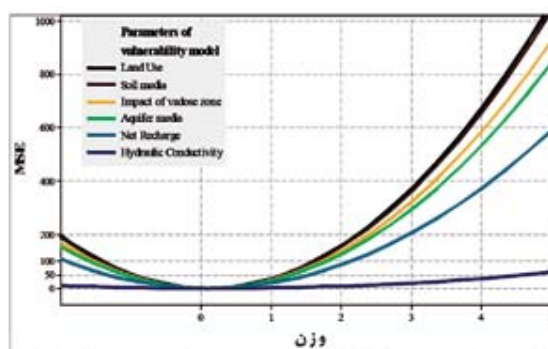


شکل ۶. نقشه آسیب‌پذیری ویژه آبخوان کاشان براساس مدل RASIC-LU

باتوجه به شکل‌های ۴ تا ۷ و مدل RASIC-LU بدست‌آمده، یک روند افزایشی در مقدار نیترات و پارامترهای آسیب‌پذیری به‌جز شیب توپوگرافی و عمق سطح ایستابی با افزایش میزان آسیب‌پذیری مشاهده می‌شود به‌طوری‌که در مناطق با آسیب‌پذیری بسیار کم، میزان نیترات کمتر از ۳ میلی‌گرم بر لیتر و در مناطق با آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد بیشتر از ۱۳ میلی‌گرم بر لیتر در طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱ می‌باشد.

منطقه غیراشباع، محیط آبخوان، تغذیه خالص و هدایت هیدرولیکی به‌ترتیب روند کاهشی نشان می‌دهد.

کاربری اراضی آبخوان کاشان عامل اصلی وجود آلودگی در آب‌های زیرزمینی می‌باشد و از نظر مکانی بالاترین حساسیت MSE را دارا می‌باشد ولی به‌دلیل میزان آلودگی کم از وزن پایینی برخوردار می‌باشد. خاک به‌دلیل اهمیت تجزیه و ترقیق سطحی آلودگی از اهمیت و حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد و از وزن بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. اثر ناحیه غیراشباع و محیط آبخوان به‌دلیل تأثیر جنس آن بر ترقیق‌کنندگی و اهمیت آن از وزن بالایی برخوردار می‌باشد ولی به‌دلیل ورود آلودگی در مراحل ثانویه و خاصیت ترقیق‌کنندگی کمتر نسبت به پارامترهای سطحی از حساسیت کمتر MSE برخوردار می‌باشد. نرخ تغذیه خالص به‌دلیل اینکه عامل اصلی حجم و انتقال آلودگی می‌باشد از همبستگی بالایی با آلاینده نیترات ولی به‌دلیل اینکه تأثیر این پارامتر و میزان آلودگی آن تحت تأثیر نوع کاربری اراضی می‌باشد از حساسیت پایین MSE و وزن متوسطی برخوردار می‌باشد. با توجه به اینکه میزان ترقیق نیترات تحت شرایط هیدروژئولوژیکی در واحد زمان از سطح به عمق کاهش می‌یابد، حساسیت پارامترها نیز از سطح به عمق کاهش یافته و هدایت هیدرولیکی نیز به‌دلیل میزان کم آن به‌دلیل شرایط محیط آبخوان، هم وزن و هم حساسیت کمتری نسبت به سایر پارامترها دارد.



شکل ۵. میزان تغییرات MSE نسبت به تغییر وزن پارامترهای مدل RASIC-LU

جهت انتخاب بهترین مدل بیشترین میزان همبستگی و سطح معنی‌داری، به‌عنوان مبنای تهیه مدل بکار گرفته شد.

همچنان که برخی از تحقیقات بیان شده در پیشینه پژوهش نیز حذف یک یا هردو پارامتر را جهت بهینه‌سازی مدل مورد تایید قرار داده بودند.

هر چند که پارامتر عمق تا سطح ایستابی با روش‌های آماری از رابطه DRASTIC در منطقه مورد مطالعه حذف گردیده است، ولیکن حذف این پارامتر در مطالعات تعیین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در مناطق دیگر پیشنهاد نمی‌شود.

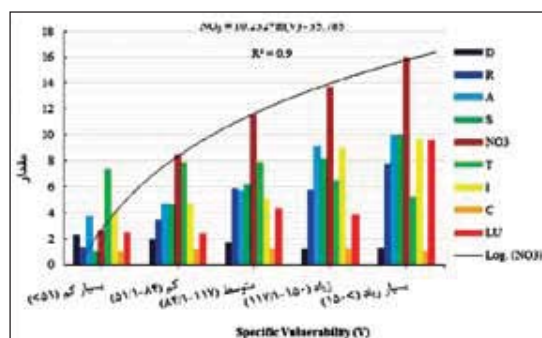
در تحقیق حاضر مشخص شد که کاربری‌های شهری، صنعتی و کشاورزی از آلاینده‌گی بیشتر و رتبه بالاتری برخوردار هستند. با توجه به اینکه در بعضی از مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا آلودگی نترات بالایی مشاهده نمی‌شود، پیشنهاد می‌گردد که از رتبه‌بندی و بررسی میزان خطرات انواع فعالیت‌های انسانی و آلودگی انواع کاربری‌های صنعتی و کشاورزی جهت رسیدن به نتایج دقیق‌تر و همبستگی بالاتر پرداخته شود.

سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از طرح پروژه پژوهشی اعطاشده به نویسنده مسئول توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای اصفهان می‌باشد که بدین وسیله از حمایت مالی و همکاری این شرکت از طرح تشکر می‌شود.

منابع

- احمدی، ع. و آبرومند، م.، ۱۳۸۸. بررسی پتانسیل آلودگی آبخوان خاش با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. زمین‌شناسی کاربردی، ۵، ۱، ۱۱-۱.
- سازمان آب کاشان، ۱۳۹۰. سطح آب‌های زیرزمینی.
- شرکت آب فاضلاب کاشان، ۱۳۹۱. یون نترات آب‌های زیرزمینی کاشان.
- صمدی، ج. a. ۱۳۹۴. ارزیابی تأثیر کاربری اراضی و آسیب‌پذیری آبخوان کاشان بر آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش DRASTIC و مدل تخریب. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱، ۱، ۲۰-۱۳.
- صمدی، ج. b. ۱۳۹۴. مدل‌سازی مکانی - زمانی تغییرات تراز سطح آب‌های زیرزمینی مناطق شهری و روستایی آبخوان کاشان با استفاده از تکنیک‌های GIS.



شکل ۷. مقادیر مشاهده‌شده نترات و میزان آسیب‌پذیری پارامترها براساس مدل RASIC-LU

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این نتایج با یافته‌های حاصل از پژوهش‌های مشابه قبلی مطابقت دارد (بخش پیشینه پژوهش). اما نوع‌آوری این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات مشابه انجام‌شده، استفاده از رتبه‌بندی‌های فازی-آماری پارامترهای مدل DRASTIC با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی می‌باشد به دلیل اینکه این روش با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17 از رتبه واقعی پارامترها براساس نتایج تحقیقات انجام‌شده استفاده می‌کند، خطا و عدم قطعیتی را که در کالیبره کردن رتبه پارامترها براساس میزان غلظت نترات و یا استفاده از منطق فازی جهت غیرقطعی و فازی کردن رخ می‌دهد را به حداقل رسانده (حداکثر R^2 خط رگرسیون)، می‌توان به نتایج بهینه‌تر و صحیح‌تر در میزان و مقدار اهمیت مکانی مدل نهایی آسیب‌پذیری دست یافت. در این پژوهش مشاهده گردید میزان همبستگی و سطح معنی‌داری به حد کافی واضح نیست و فقط هنگام استفاده از مدل RASIC-LU و روش‌های آماری به حد قابل قبولی (افزایش ۱۲ درصدی) می‌رسد. مدل RASIC-LU که بازبینی وزن‌های آن با استفاده از روش‌های آماری انجام شد، بیشترین میزان همبستگی را با مقدار غلظت نترات در منطقه مورد مطالعه نشان داد و به‌عنوان مناسب‌ترین مدل در این پژوهش انتخاب گردید.

در این مطالعه، با توجه به شرایط منطقه و میزان همبستگی پارامترها جهت بهینه‌سازی مدل دو پارامتر عمق تا سطح ایستابی و شیب توپوگرافی از مدل حذف گردید

- Tunisia. *Water and Environment*, 25, 400-411.
- Javadi, S., Kavehkar, N., Mohammadi, K., Khodadadi, A. and Kahawita, R., 2011. Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International*, 36, 6, 719-732.
 - Krishna, R., Iqbal, J., Gorai, A.K., Pathak, G., Tuluri, F. and Tchounwon, P.B., 2014. Groundwater vulnerability to pollution mapping of Ranchi district using GIS. *Applied Water Sciences*, 4, 12, 14.
 - Lindstrom, R., 2005. Groundwater vulnerability assessment using process-based models. *Trita-Lwr PhD Thesis 1022*, Stockholm, Sweden, 36.
 - Lodwick, W.A., Monson, W. and Svoboda, L., 1990. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *Geographic Information System*, 4, 4, 413-28.
 - Napolitano, P. and Fabbri, A.G., 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS HydroGIS, 96: application of geographical information systems in hydrology and water resources management. *Proceedings of Vienna Conference*, 235, 559-66.
 - Panagopoulos, G.P., Antonakos, A.K. and Lambrakis, N.J., 2006. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology*, 14, 6, 894-911.
 - Pearson, K., 1896. Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity and panmixia, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 187, 253-318.
 - Piscopo, G., 2001. Groundwater vulnera-
 - علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۸، ۱.
 - طیبیان، آ.، ۱۳۹۰. ارائه الگوریتم توسعه شاخص آسیب‌پذیری آبخوان در مناطق خشک و نیمه خشک. *دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران*، ۱۶.
 - متکان، ع.ا، نصری، ح.ر. و هاشمی، ز.، ۱۳۸۷. تصحیح روش DRASTIC مبتنی بر GIS با استفاده از روش‌های آماری و تحلیل سلسله‌مراتبی، مطالعه موردی دشت همدان - بهار. *سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران*، ۹.
 - محمدی، ک.، جوادی پیربازاری، س. و کاوه‌کار، ن.، ۱۳۸۷. واسنجی روش DRASTIC نسبت به آلودگی نترات در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آستانه-کوچه‌صفهان با استفاده از روش‌های آماری و GIS. *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران*، ۸.
 - موسسه آب و خاک تهران، ۱۳۸۸. نقشه قابلیت آبخوان کاشان.
 - Aller, L., Bennet, T., Leher, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, E.P.A., Report, No.600/2-87-035, 622.
 - Baier, K., Schmitz, K.S., Azzam, R. and Strohschön, R., 2014. Management tools for sustainable ground water protection in mega urban areas - small scale land use and ground water vulnerability analysis in Guangzhou, China. *International Journal of Environmental Research*, 8, 2, 249-262.
 - Evans, T.A. and Maidment, D.R., 1995. A spatial and statistical assessment of vulnerability of Texas groundwater to nitrate contamination. *Center of Research in Water Resources, The University of Texas at Austin, USA*, 257.
 - Harter, T. and Wilker, I.G., 2001. Assessing vulnerability of groundwater. *US Natural Resources Conservation Service*, 13.
 - Hentati, I., Zairi, M. and Ben Dhia, H., 2011. A statistical and geographical information system analysis for groundwater intrinsic vulnerability: a validated case study from Sfax-Agareb,

- bility map explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW. Department of Land and Water Conservation, Australia.
- Rosen, L.A., 1994. A study of the DRAS-TIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Groundwater*, 32, 2, 278-285.
 - Sorichetta, A., Masetti, M., Ballabio, C., Sterlacchini, S. and Beretta, G.P., 2011. Reliability of groundwater vulnerability maps obtained through statistical methods. *Journal of Environmental Management*, 92, 4, 1215-1224.
 - Spitz, K. and Moreno, J., 1996. Practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley and Sons, New York, 461.
 - Vrba, J. and Zaporozec, A., 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH, International Contribution for Hydrogeology, 16, 131.