



دانشگاه گوارز و زمین‌شناسی گوارز

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیستم، شماره سوم، ۱۳۹۲  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## تعیین آسیب‌پذیری آب‌خوان با استفاده از مدل دراستیک و اعمال آنالیز حساسیت تک‌پارامتری و حذفی (مطالعه موردی: دشت سلفچگان - نی‌زار)

جعفر احمدی<sup>۱</sup>، لیلی آخوندی<sup>۲</sup>، هادی عباسی<sup>۳</sup>، \*عباس خاشعی‌سیوکی<sup>۴</sup> و مجتبی علیمددی<sup>۵</sup>  
<sup>۱</sup> کارشناس گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید عباسپور، آکارشناس ارشد گروه شیمی تجزیه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، <sup>۲</sup> دانشجوی دکتری گروه علوم زیستی کاربردی - تکنولوژی محیط زیست، دانشگاه گنت بلژیک، <sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، <sup>۴</sup> کارشناس گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۶/۲۵

### چکیده

یکی از راه‌کارهایی که امروزه در کشورهای پیشرفته برای حفاظت از سفره‌های آب زیرزمینی به‌کار می‌رود، جلوگیری و پیش‌گیری آب‌خوان از آلوده شدن می‌باشد. در این پژوهش آسیب‌پذیری آب‌خوان دشت سلفچگان - نی‌زار در برابر آلودگی کشاورزی، به کمک مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی ارزیابی شد. در این روش، ۷ عامل هیدروژئولوژیک مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی ترکیب شدند. این ۷ عامل عبارتند از: عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آب‌خوان، محیط آب‌خوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی. نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری، برگرفته از نتایج به‌دست آمد، سپس برای تدقیق پهنه‌های آسیب‌پذیری از طریق آلودگی نترات در محدوده پهنه‌های آسیب‌پذیری با همبستگی به‌نسبت مناسبی تدقیق گردید. با استفاده از تکنیک‌های GIS و به‌وسیله تحلیل حساسیت تک‌پارامتری، میزان تأثیرگذاری پارامترهای به‌کار رفته در روش‌های نام برده، بر آسیب‌پذیری آب‌خوان دشت سلفچگان - نی‌زار بررسی شد نتایج مربوط به حریم‌های مختلف کیفی نشان داد که حریم کیفی محدوده مطالعاتی در ۴ رده حریم‌های خیلی کم، کم، متوسط و بالا قرار دارد که به‌ترتیب قبل از تصحیح مدل ۵۵۰، ۸۵۳، ۱۵۰ و ۴۹۸ کیلومتر مربع و بعد از

\* مسئول مکاتبه: [abbaskhashei@birjand.ac.ir](mailto:abbaskhashei@birjand.ac.ir)

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۲۰)، شماره (۳) ۱۳۹۲

تصحیح مدل مقادیر یادشده به ترتیب ۳۵۱، ۴۸۶، ۴۰۱، ۴۲۵ و ۴۰۴ کیلومترمربع تغییر یافت. به طور کلی نتایج تحلیل حساسیت تک‌پارامتری در این روش نشان داد که وزن مؤثر و تئوریک پارامترهای به کار رفته، کاملاً بر هم منطبق نیستند و در بعضی موارد تفاوت‌های قابل توجهی با هم دارند.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دراستیک (DRASTIC)، آب‌خوان دشت سلفچگان- نی‌زار، آسیب‌پذیری، تحلیل حساسیت

### مقدمه

آب زیرزمینی از مهم‌ترین منابع طبیعی در جهان می‌باشد، در شرایط کنونی، بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف آب کشور ایران به‌خصوص در بخش شرب توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. بنابراین، حفاظت کیفی آب‌های زیرزمینی اهمیت بسیاری دارد. در بسیاری از موارد آلودگی آب‌های زیرزمینی، بعد از آلوده شدن چاه‌های آب شرب شناسایی می‌شوند. رفع آلودگی آب زیرزمینی بسیار پرهزینه و فرآیندی طولانی است و بیش‌تر زمانی آلودگی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آب‌خوان تقریباً غیرممکن می‌گردد.

یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آب‌خوان و مدیریت کاربری اراضی است (خدایی و همکاران، ۲۰۰۷). از آنجایی که در دشت سلفچگان عمده کاربری به‌صورت کشاورزی صورت گرفته و از کودهای شیمیایی نیز استفاده می‌شود و همچنین وجود فاضلاب شهری و روستایی، منابع آب زیرزمینی دشت سلفچگان- نی‌زار در معرض خطر آلودگی قرار می‌گیرد، بنابراین با تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری و مدیریت صحیح می‌توان از منابع آب زیرزمینی دشت سلفچگان- نی‌زار و همچنین دشت‌های مشابه، محافظت کرد. مفهوم آسیب‌پذیری برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه ارایه شده است (وربا و زوپورویچ، ۱۹۹۴). امکان نفوذ و انتشار آلاینده‌ها به درون سیستم آب زیرزمینی را آسیب‌پذیری می‌نامند. آسیب‌پذیری به‌عنوان یک استعداد ذاتی سیستم آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود که وابسته به‌میزان حساسیت این سیستم به تأثیرات انسانی و یا طبیعی می‌باشد.

توسعه روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی سهم عمده‌ای در آلودگی‌های محیط زیست به‌ویژه آب دارد (رحمان، ۲۰۰۸). بنابراین فعالیت‌های انسان در بعضی از موارد به توازن‌های ظریف موجود در طبیعت آسیب می‌رساند بعضی از این آسیب‌ها توسط طبیعت قابل جبران هستند.

## جعفر احمدی و همکاران

به عبارتی طبیعت قادر است بعضی از خرابی‌ها را ترمیم و محیط خود را تصفیه نماید. اما توانایی جبران آلودگی در طبیعت شامل تمام آسیب‌های وارده به آن نمی‌شود و نیز جبران خسارات وارده به زمان زیاد نیاز دارد. بنابراین، انسان باید با شناخت<sup>۱</sup>، پیشگیری<sup>۲</sup> و یا مقابله با آلودگی‌ها<sup>۳</sup>، آن‌ها را در کنترل خود درآورد. یکی از مهم‌ترین منابع آبی آسیب‌پذیر در برابر آلودگی، آب‌خوان‌ها می‌باشند (کنودل و همکاران، ۲۰۰۷).

این منابع به شکل‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارند که تشخیص و کنترل آلودگی در آن‌ها نسبت به آب‌های سطحی مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. همچنین، به دلیل استمرار آلودگی در این منابع، بهترین روش جلوگیری از آلودگی آن‌ها، شناسایی منابع آلوده‌کننده و مناطق آسیب‌پذیر، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مناسب می‌باشد (بایبکر و همکاران، ۲۰۰۵).

تاکنون تعاریف زیادی در مورد آسیب‌پذیری آب‌خوان و مفهوم آن در هیدروژئولوژی ارائه شده است، که از آن جمله می‌توان به تعریف کمیته ملی علوم آمریکا در سال ۱۹۹۳ اشاره کرد. این کمیته، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی را، تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از به‌وجود آمدن آن‌ها در برخی محل‌ها در بالای سطح آب‌خوان می‌داند (الماسری، ۲۰۰۸).

اصطلاح آسیب‌پذیری از نظر مفهومی در هیدروژئولوژی به دو صورت آسیب‌پذیری ذاتی<sup>۴</sup> و آسیب‌پذیری ویژه<sup>۵</sup> تقسیم می‌شود (گوگا و داسارگوس، ۲۰۰۰؛ الماسری، ۲۰۰۸). آسیب‌پذیری ذاتی به امکان آلودگی در یک منطقه بدون در نظر گرفتن آلاینده خاص اشاره دارد (الماسری ۲۰۰۸). به عبارتی، این نوع آسیب‌پذیری به ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی یک منطقه و فعالیت‌های بشری بستگی دارد و مستقل از ماهیت آلاینده است (گوگا و داسارگوس، ۲۰۰۰). روش‌هایی مانند دراستیک<sup>۶</sup> به منظور ارزیابی این نوع آسیب‌پذیری استفاده می‌شوند (همزا، ۲۰۱۰). آسیب‌پذیری ویژه نیز به آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلاینده یا گروهی خاص از آلاینده‌ها اشاره دارد که به ویژگی‌های آلاینده و ارتباط آن با مؤلفه‌های مختلف آسیب‌پذیری ذاتی بستگی دارد (گوگا و داسارگوس ۲۰۰۰). روش شاخص حساسیت<sup>۷</sup> یکی از روش‌هایی است که برای ارزیابی این نوع آسیب‌پذیری

- 1- Characterization
- 2- Prevention
- 3- Remediation
- 4- Intrinsic Vulnerability
- 5- Specific Vulnerability
- 6- DRASTIC
- 7- SI Susceptibility Index

استفاده می‌شود و در آن آسیب‌پذیری آب‌خوان به‌طور مشخص نسبت به آلاینده‌های کشاورزی (نیترات) بررسی می‌گردد (همزا، ۲۰۱۰). روش‌های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک آب‌خوان وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، روش‌های آماری و روش‌های شاخص و هم‌پوشان اشاره کرد (الماسری، ۲۰۰۸). دراستیک یک روش شاخص و هم‌پوشان است که در آن، اطلاعات به‌دست آمده از پارامترهای مختلف به‌صورت تلفیقی و به‌طور موازی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی پردازش می‌گردند. اصولاً روش‌های شاخص و هم‌پوشان از ترکیب پارامترهای هیدروژئولوژیک مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌شوند. در این روش‌ها برای تعیین اهمیت نسبی، هر کدام از پارامترها نسبت به سایرین ارزیابی می‌شوند. گرچه این روش‌ها فرایندهای مؤثر در آلوده شدن منابع آب زیرزمینی را به‌طور کامل شرح نمی‌دهند، اما به‌دلیل ساده بودن روش و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (گوگا و داسارگوس، ۲۰۰۰).

در بیش‌تر روش‌های شاخص و هم‌پوشان و از جمله روش دراستیک، باید اطلاعات به‌دست آمده از پارامترهای مختلف به‌صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شوند. سامانه اطلاعات جغرافیایی، به‌دلیل ویژگی‌ها و توانایی‌های خاص خود، نیز می‌تواند ابزاری بسیار مفید باشد. این سامانه قابلیت جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل هم‌زمان پارامترهای مختلف را دارد و نمایش داده‌های مکانی را در مدت زمان کوتاه فراهم می‌سازد. هزینه کم، دقت محاسباتی بالا، استفاده از توابع تحلیلی پیچیده، قابلیت تفکیک طیفی، مکانی و زمانی قابل توجه و قابلیت‌های ویرایشی و به‌هنگام‌سازی سریع داده‌ها، مدل‌سازی و تهیه گزارش به شکل‌های گوناگون از ویژگی‌های دیگر این سامانه می‌باشند (رحمان، ۲۰۰۸).

در این پژوهش آسیب‌پذیری آب‌خوان دشت سلفچگان در برابر آلودگی به کمک مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی ارزیابی شده است. مدل دراستیک یک مدل تجربی است که اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (آلر و همکاران، ۱۹۸۷) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ایالات متحده مطرح و براساس مفهوم وضعیت هیدروژئولوژیکی<sup>۱</sup> استوار است. وضعیت هیدروژئولوژیکی در واقع بیانگر ترکیبی از همه فاکتورهای زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی است که حرکت آب‌های زیرزمینی را در یک منطقه کنترل می‌کند (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

روش دراستیک که در این پژوهش از آن جهت ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی دشت سلفچگان استفاده شد، جزو روش‌های رتبه و وزندهی هستند و برای تولید نمرات آسیب‌پذیری برای

## 1- Hydrogeological Setting

نقاط مختلف با ترکیب چندین لایه موضوعی طراحی شده‌اند. از این روش‌ها، در ابتدا برای هم‌پوشانی دستی لایه‌های نیمه‌کمی استفاده می‌گردید. امروزه با استفاده از تکنیک GIS این کار آسان‌تر شده و دقت انجام این محاسبه‌ها نیز تا حد زیادی افزایش یافته است. با یک تعریف ساده GIS یک تکنولوژی اطلاعاتی کامپیوتری است که ذخیره، تحلیل و نمایش داده‌های فضایی و غیرفضایی را انجام می‌دهد. اولین برتری GIS این است که لایه‌های اطلاعاتی متفاوت را از منابع و مقیاس‌های گوناگون در درون یک سیستم قرار می‌دهد. این برتری‌ها GIS را به‌عنوان یک ابزار گرانبها برای مدیریت فرآیند مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، تحلیل نتایج، به روز کردن و بایگانی مجموعه داده‌های مکانی مرجع، مناسب می‌سازد (اختری، ۲۰۰۷). یکی از بزرگ‌ترین برتری‌های روش‌های رتبه‌دهی، انجام بررسی با استفاده از تعداد بیش‌تری لایه‌های ورودی است (اختری، ۲۰۰۷). که تأثیر خطاها و یا عوامل نامعلوم را بر روی خروجی نهایی محدود می‌کند (اختری، ۲۰۰۷). بعضی از پژوهش‌گران معتقدند که می‌توان با استفاده از تعداد کم‌تری پارامترهای ورودی، با هزینه کم‌تر و دقت بیش‌تر به نتیجه مطلوب دست یافت. هدف از این پژوهش، علاوه‌بر شناخت وضعیت آسیب‌پذیری دشت سلفچگان مسبت به اراضی کشاورزی است همچنین مؤثرترین پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌خوان دشت سلفچگان نیز بررسی می‌شود که این کار توسط تحلیل حساسیت امکان‌پذیر می‌باشد. در نتیجه با استفاده از تحلیل حساسیت تک‌پارامتری در محیط GIS، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار با استفاده از روش آسیب‌پذیری دراستیک بر پتانسیل آلودگی منابع آب زیرزمینی دشت سلفچگان بررسی شد.

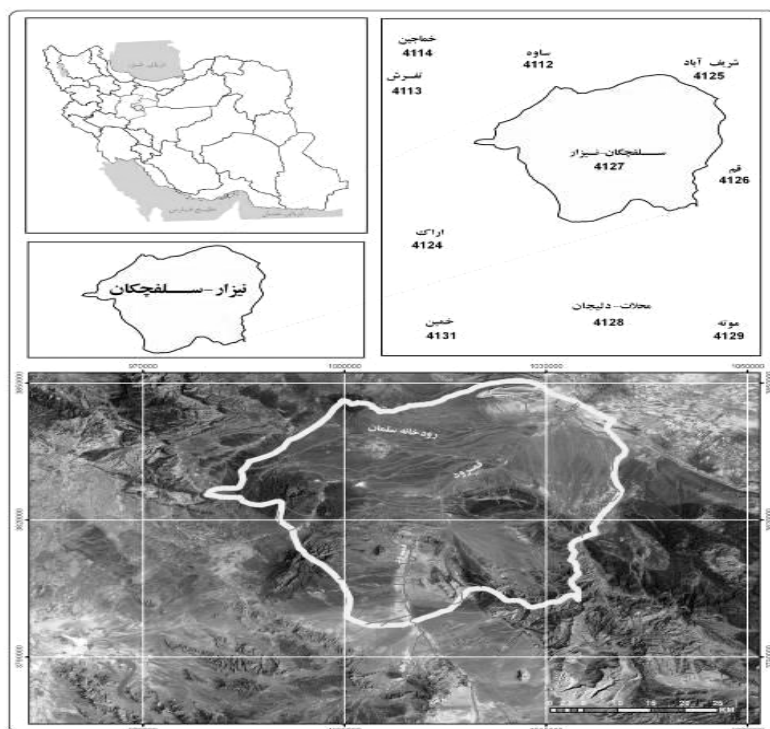
### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** مطابق شکل ۱ محدوده مطالعاتی سلفچگان- نی‌زار یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه آبریز دریاچه نمک کشور ایران می‌باشد، وسعت این محدوده بالغ بر ۳۷۲۴ کیلومترمربع می‌باشد. محدوده مطالعاتی سلفچگان نی‌زار در محدوده استان قم با ۲۰۵۱ کیلومترمربع وسعت، بین طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی گسترده شده است. تنوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه از نظر جنس و فرسایش‌پذیری، اثر پدیده‌های زمین‌ساختی مانند چین‌خوردگی‌ها و گسل‌ها، فوران‌های پیاپی آتشفشانی و اثر پهنه فرو نشسته دریاچه نمک به همراه دیگر عوامل در پیدایش مورفولوژی کنونی محدوده نقش اساسی و مؤثر داشته‌اند. از دیدگاه ریخت‌شناسی می‌توان منطقه را به ۳ بخش تقسیم کرد:

**نواحی مرتفع:** این مناطق در منتهی‌الیه شمالی محدوده (کوه یزدان و کوه زردکمر)، نواحی مرکزی (کوه خستک، کوه سخت‌حصار، کوه گل‌گز) و نواحی جنوبی (کوه قره‌قونی، کوه سنگ‌خوریده، کوه خورزین) دیده می‌شوند. ارتفاعات شمالی دربرگیرنده سنگ‌های رسوبی و آذر آواری ائوسن-لیگوسن و کوهستان‌های بخش جنوبی به‌طور عمده از سنگ آهک کرتاسه و به‌میزان کم از ماسه‌سنگ آهک ژوراسیک پدید آمده‌اند.

**کوه‌های کم بلندا و تپه‌های ماهوری:** در نواحی شمالی ردیف‌های ولکانیکی بلندی‌های متوسطی را به‌وجود آورده‌اند همچنین نهشته‌های رسوبی و آذرآواری ائوسن در این نواحی توپوگرافی با شیب ملایم را به‌وجود آورده‌اند. همچنین نهشته‌های شیلی و ماسه‌سنگ مربوط به ژوراسیک در جنوب محدوده باعث ایجاد مناطق تپه‌ماهوری گردیده است.

**دشت‌های پست و کم بلندا:** این نواحی در بیش‌تر قسمت‌های محدوده دیده می‌شود و شامل آبرفت‌های دوران کواترنری می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی.

ارزیابی آسیب پذیری به روش دراستیک: واژه دراستیک عبارت از حروف اول ۷ پارامتر اصلی تأثیرگذار در این روش می باشد. این روش براساس پارامترهای عمق آب<sup>۱</sup>، تغذیه خالص<sup>۲</sup>، محیط آبخوان<sup>۳</sup>، بافت خاک<sup>۴</sup>، توپوگرافی<sup>۵</sup>، تأثیر منطقه غیراشباع<sup>۶</sup> و هدایت هیدرولیکی آبخوان<sup>۷</sup> می باشد (جدول ۱). ارزیابی آسیب پذیری هر منطقه باید براساس اهمیت هر یک از پارامترها در آن منطقه صورت گیرد و همچنین باید توجه داشت که بعضی از پارامترها بر روی هم تأثیرگذار می باشند (یارمحمدی، ۲۰۰۷).

این ۷ پارامتر در محیط نرم افزار (GIS) به صورت ۷ لایه که تحلیل های لازم بر روی آن ها انجام می شود، ظاهر می گردند.



شکل ۲- موقعیت محدوده آبخوان و چاه های مشاهده ای برای آنالیزهای کیفی.

- 1- D
- 2- R
- 3- A
- 4- S
- 5- T
- 6- I
- 7- C

### نقش پارامترهای مدل دراستیک در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌خوان

عمق آب زیرزمینی (D)<sup>۱</sup>: این پارامتر تعیین‌کننده عمقی است که آلوده‌کننده باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد و اهمیت قابل‌توجهی دارد. معمولاً ظرفیت میرایی با افزایش عمق تا سطح ایستابی افزایش می‌یابد چرا که هر چقدر سطح آب عمیق‌تر باشد موجب می‌گردد تا زمان حرکت و ماندگاری آلوده‌کننده افزایش یابد. حضور لایه‌های با تراوایی کم که آب‌خوان را محصور می‌سازند نیز موجب ایجاد محدودیت در حرکت آلوده‌کننده به یک آب‌خوان می‌شوند. عمق تا سطح ایستابی در آب‌خوان‌های محصور به‌صورت عمق تا بالای آب‌خوان در نظر گرفته می‌شود. در آب‌خوان‌های نیمه تحت فشار با توجه به شرایط آب‌خوان و ویژگی‌های آن به‌صورت تحت فشار و یا به‌صورت آزاد در نظر گرفته می‌شود.

هرچه عمق سطح ایستابی بیش‌تر باشد زمان بیش‌تری طول می‌کشد تا مواد آلاینده به آب‌های زیرزمینی برسند. در نتیجه در اثر هم‌کنش‌های طبیعی مانند تجزیه شیمیایی، جذب سطحی<sup>۲</sup> و پخش<sup>۳</sup> امکان پالایش مواد آلاینده افزایش می‌یابد. بنابراین، سطوح ایستابی عمیق‌تر شانس آلودگی کم‌تری دارند. **تغذیه خالص آب‌خوان (R)**<sup>۴</sup>: تغذیه عاملی برای نفوذ و انتقال آلاینده‌ها به منطقه اشباع از طریق ناحیه غیراشباع است. معمولاً با افزایش میزان تغذیه در یک منطقه، پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی در آن منطقه افزایش می‌یابد.

**مواد تشکیل‌دهنده آب‌خوان (A)**<sup>۵</sup>: این عامل به خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده منطقه اشباع مانند میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات و جورشدگی ذرات اشاره دارد که میزان پویایی و تحرک آلودگی و به‌عبارتی فرایندهای رقیق‌سازی آلودگی مانند تجزیه شیمیایی، جذب، پخش و تأخیر<sup>۶</sup> را کنترل می‌کند. **نوع خاک (S)**<sup>۷</sup>: به بخش هوازده بالایی منطقه غیراشباع گفته می‌شود که تا حد نفوذ ریشه گیاهان ادامه دارد. این بخش از نظر فعالیت‌های بیولوژیکی و وجود مواد آلی اهمیت بسیاری دارد و میزان آب نفوذی و نیز نفوذ آلاینده‌ها را به داخل آب‌خوان کنترل می‌کند. به‌طورکلی هر قدر اندازه ذرات

- 1- Depth to Water
- 2- Adsorption
- 3- Dispersion
- 4- Recharge
- 5- Aquifer
- 6- Retardation
- 7- Soil Media



تشکیل‌دهنده خاک ریزتر و نفوذپذیری خاک کم‌تر و درصد مواد آلی و ضخامت خاک بیش‌تر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد.

**توپوگرافی (T):** توپوگرافی به‌صورت شیب و تغییرات شیب سطح زمین مورد توجه قرار می‌گیرد. توپوگرافی حرکت آلوده‌کننده و نگهداری آن را بر سطح زمین در کنترل دارد. شیب‌هایی که موجب می‌شوند آلوده‌کننده‌ها شانس بیش‌تری برای نفوذ داشته باشند دارای پتانسیل بیش‌تری برای آلودگی آب زیرزمینی خواهند بود. همچنین توپوگرافی بر گسترش خاک و در نتیجه بر میرایی آلوده‌کننده مؤثر است. شیب‌های کم به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی باعث کاهش رواناب و افزایش نفوذ به آب‌خوان و در نتیجه انتقال بیش‌تر آلودگی به آب زیرزمینی می‌شود. درصد شیب با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع محاسبه می‌شود. شیب سطح زمین علاوه‌بر این‌که بر حرکت و نفوذ آب‌های سطحی و آلاینده‌ها در سطح زمین تأثیر می‌گذارد، بر گسترش خاک و در نتیجه بر میرایی<sup>۲</sup> آلاینده‌ها نیز مؤثر است. بنابراین هرچه شیب سطح زمین کم‌تر باشد زمان تماس آب‌های سطحی و آلاینده‌ها با سطح زمین بیش‌تر است و در نتیجه امکان نفوذ آلاینده‌ها به داخل آب‌خوان بیش‌تر می‌شود.

**اثر منطقه غیراشباع (I):** منطقه غیراشباع منطقه بالایی سطح ایستابی است که از آب غیراشباع باشد و یا به‌صورت غیرپیوسته از آب اشباع شده باشد. ضخامت و خصوصیات هیدرولیکی تشکیلات زمین‌شناسی منطقه غیراشباع از عوامل کلیدی تعیین‌کننده آلودگی آب‌خوان بوده و کنترل‌کننده‌های اصلی و طبیعی نرخ تغذیه و مدت زمان تغذیه به آب‌خوان می‌باشند. منطقه غیراشباع با نگهداشت، جذب و حذف ویروس‌های بیماری‌زا و باکتری‌ها، جذب و کاهش بسیاری از مواد شیمیایی و آلی و مصنوعی، رقیق کردن غلظت فلزات سنگین و مواد شیمیایی غیرآلی دیگر از طریق جذب و واکنش با سطح کانی‌ها، در جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی نقش مهمی ایفا می‌کند. عواملی که در تعیین اثر منطقه غیراشباع در حوضه مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از تراوایی خاک و عمق آب زیرزمینی.

شامل قسمت قرار گرفته مابین سطح ایستابی و محیط خاک می‌شود که اساساً غیراشباع بوده و یا به‌طور ناپیوسته اشباع می‌باشد و عبور و رقیق شدن مواد آلاینده را به منطقه اشباع کنترل می‌کند. تأثیر منطقه غیراشباع در آلودگی آب‌خوان، مشابه محیط خاک بوده و به نفوذپذیری مواد تشکیل‌دهنده و خصوصیات محیط غیراشباع بستگی دارد.

- 1- Topography
- 2- Attenuation
- 3- Impact of the Vadose Zone Media

**هدایت هیدرولیکی (C):** هدایت هیدرولیکی عبارت است از قابلیت مواد تشکیل دهنده آب‌خوان برای انتقال آب، که به نوبه خود بر شدت جریان آب زیرزمینی که تحت یک شیب هیدرولیکی مشخص در جریان است کنترل دارند. هدایت هیدرولیکی با مقدار فضاهای خالی و اتصال بین آن‌ها در آب‌خوان کنترل می‌شود و حاصل تخلخل بین‌دانه‌ای، ایجاد درز و شکاف و صفحات لایه‌بندی شده می‌باشند. توانایی مواد تشکیل‌دهنده آب‌خوان در انتقال آب، هدایت هیدرولیکی نامیده می‌شود که به درصد فضاهای خالی مرتبط به هم در لایه آب‌دار (تخلخل مؤثر) بستگی دارد. هدایت هیدرولیکی حرکت آلاینده و پخش آن را از نقطه نفوذ تا رسیدن به منطقه اشباع کنترل می‌نماید. بنابراین، هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آب‌خوان بیشتر خواهد بود. برای هر پارامتر دراستیک بالاترین و پایین‌ترین محدوده‌های عددی و انواع محیط‌های مهم و مؤثر در حوضه موردنظر براساس اثر آن‌ها بر پتانسیل آلودگی تعیین می‌شوند. درجه‌بندی هر یک از این پارامترها براساس موقعیت پارامتر نام برده در این محدوده‌ها می‌باشد. به هر یک از پارامترهای دراستیک با توجه به موقعیت آن‌ها در محدوده‌های ذکر شده ارزشی بین ۱-۱۰ نسبت داده می‌شود. (جدول‌های ۱ تا ۸).

با تعیین عوامل بالا شاخص دراستیک و یا به عبارت دیگر پتانسیل آلودگی (آسیب‌پذیری) در هر سلول یا چندضلعی موجود در نقشه به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = \text{شاخص آسیب‌پذیری} \quad (1)$$

که در آن،  $r$ : درجه‌بندی و  $w$ : وزن هر یک از پارامترهاست. در این رابطه حروف،  $I, T, S, A, R, D$  و  $C$  پارامترهای هیدرولوژیک تأثیرگذار در مدل دراستیک می‌باشند، بنابراین شاخص آسیب‌پذیری در این روش از حاصل ضرب هر پارامتر در رتبه آن به دست می‌آید (رحمان، ۲۰۰۸).

رتبه مربوط به هر پارامتر بین ۱ تا ۱۰ متغیر است و وزن هر پارامتر با توجه به اهمیت آن بین ۱ تا ۵ متغیر می‌باشد (مهم‌ترین پارامتر دارای وزن ۵ و کم‌اهمیت‌ترین پارامتر دارای وزن ۱ است).

**تهیه نقشه شاخص آسیب‌پذیری:** در ابتدا به منظور وارد نمودن آمار و اطلاعات موجود به محیط نرم‌افزارهای مربوطه و همچنین پردازش داده‌های اولیه، اقدام به تهیه پایگاه اطلاعاتی در محیط اکسل (Excel) گردید. با استفاده از نرم‌افزار (Arc GIS) منحنی‌ها (contour) برای هر یک از لایه‌ها ترسیم گردید. در ادامه با استفاده از تحلیل گر سه‌بعدی (3D Analyst) کنتورهای ساخته شده را به نقشه با مد ارتفاعی تبدیل نموده تا فواصل بین کنتورها نیز دارای ارزش شوند، سپس نقشه با مد ارتفاعی را به

نقشه رستری تبدیل نموده تا هر سلول دارای ارزش شود. در مرحله بعد نقشه‌های رستری تهیه شده برای هر لایه با کمک همین برنامه براساس استانداردهای روش دراستیک جدول‌های ۱ تا ۷ کلاسه‌بندی و ارزش‌گذاری شدند. سپس با استفاده از تحلیل‌گر مکانی (Spatial Analyst) هر لایه در وزن در نظر گرفته شده، ضرب شد و در نهایت برای به‌دست آوردن شاخص نهایی دراستیک لایه‌های هفت‌گانه تهیه شده جدول‌های ۱ تا ۸ مطابق رابطه ۱ در محیط نرم‌افزار جی آی اس (GIS) با هم جمع گردیدند. در تلفیق لایه‌ها در واقع ارزش عددی مربوط به هر سلول در یک لایه رستری با ارزش عددی سلول متناظر آن در لایه‌های رستری دیگر با هم جمع شده و در نهایت به‌صورت نقشه‌ای رستری، که همه سلول‌های آن دارای ارزش هستند و پتانسیل آلودگی را در نواحی مختلف نقشه به‌صورت طیف رنگی نشان می‌دهند، نمایان می‌شوند.

جدول ۱- محدوده‌ها و رتبه‌بندی‌های عمق آب زیرزمینی (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

D- عمق آب زیرزمینی (Depth to water) (متر)	
رتبه‌بندی	محدوده
۱۰	۰-۱/۵
۹	۱/۵-۴/۶
۷	۴/۶-۹/۱
۵	۹/۱-۱۵/۲
۳	۱۵/۲-۲۲/۸
۲	۲۲/۸-۳۰/۴
۱	>۳۰/۴

وزن‌دهی: ۵

جدول ۲- محدوده‌ها و رتبه‌بندی‌های تغذیه خالص (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

R- تغذیه خالص (Net Recharge) (میلی‌متر)	
رتبه‌بندی	محدوده
۱	۰-۵۰/۸
۳	۵۰/۸-۱۰۱/۶
۶	۱۰۱/۶-۱۷۷/۸
۸	۱۷۷/۸-۲۵۴
۹	>۲۵۴

وزن‌دهی: ۴

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۲۰)، شماره (۳) ۱۳۹۲

جدول ۳- محدوده‌ها و رتبه‌بندی‌های محیط آب‌خوان (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

A- محیط آب‌خوان (Aquifer media)

رتبه‌بندی	محدوده
۲	شیل توده‌ای
۳	آذرین / دگرگونی
۴	آذرین / دگرگونی هوازده
۵	یخرفت‌ها
۶	ماسه‌سنگ لایه‌لایه، سنگ‌آهک و توالی شیل‌ها
۶	ماسه‌سنگ توده‌ای
۸	سنگ‌آهک توده‌ای
۸	شن و ماسه
۹	بازالت
۱۰	سنگ‌آهک کارستی

وزن‌دهی: ۳

جدول ۴- محدوده‌ها و رتبه‌بندی‌های محیط خاک (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

S- نوع خاک (Soil media)

رتبه‌بندی	محدوده
۱۰	نازک یا نبود لایه خاک
۱۰	شن
۹	ماسه
۸	کود گیاهی (peat)
۷	رس فشرده / یا متراکم
۶	لوم ماسه‌ای
۵	لوم
۴	لوم سیلتی
۳	لوم رس‌دار
۲	کود (muck)
۱	رس غیرمتراکم

وزن‌دهی: ۲

جعفر احمدی و همکاران

جدول ۵- محدوده‌ها و رتبه‌بندی توپوگرافی (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

T- توپوگرافی (Topography) (درصد شیب)	
رتبه‌بندی	رتبه‌بندی
۱۰	۰-۲
۹	۲-۶
۵	۶-۱۲
۳	۱۲-۱۸
۱	>۱۸

وزن‌دهی: ۱

جدول ۶- محدوده‌ها و رتبه‌بندی‌های محیط غیراشباع (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

I- اثر منطقه غیراشباع (Impact of the vadoze zone media)	
رتبه‌بندی	محدوده
۱	لایه مجبوس‌کننده
۳	سیلت / رس
۳	شیل
۶	سنگ آهک
۶	ماسه سنگ
۶	ماسه سنگ، سنگ آهک و شیل‌های لایه‌لایه
۶	شن و ماسه با مقدار زیادی رس و سیلت
۴	آذرین / دگرگونی
۸	شن و ماسه
۹	بازالت
۱۰	سنگ آهک کارستی

وزن‌دهی: ۵

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۲۰)، شماره (۳) ۱۳۹۲

جدول ۷- محدوده‌ها و رتبه‌بندی‌های هدایت هیدرولیکی آب‌خوان (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

C- هدایت هیدرولیکی (Hydraulic Conductivity) (متر بر روز)

رتبه‌بندی	محدوده
۱	۰/۰۴-۴/۱
۲	۴/۱-۱۲/۳
۴	۱۲/۳-۲۸/۷
۶	۲۸/۷-۴۱
۸	۴۱-۸۲
۱۰	>۸۲

وزن‌دهی: ۳

جدول ۸- رتبه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری.

کلاس آسیب‌پذیری	دامنه تغییرات
خیلی کم	۱۰۳-۱۱۹
کم	۱۱۹-۱۳۵
متوسط	۱۳۵-۱۵۱
بالا	۱۵۱-۱۶۷
خیلی بالا	۱۶۷-۱۸۳

بعد از تعیین نقشه آسیب‌پذیری، واسنجی مدل دراستیک با ایجاد رابطه همبستگی بین دو پارامتر آسیب‌پذیری و نترات صورت گرفت. در این راستا پژوهش‌گران بسیاری با استفاده از رابطه همبستگی بین نتایج مدل آسیب‌پذیری دراستیک و آلودگی نترات موجود و یا آلودگی‌های دیگر مانند مواد شیمیایی فرار به اصلاح مدل موجود پرداختند.

اما برای به‌کارگیری غلظت یک آلودگی همانند نترات شرایط زیر باید فراهم گردد (یارمحمدی و چیت‌سازان، ۲۰۰۶):

- نترات وارد شده به آب‌های زیرزمینی باید از فعالیت‌های کشاورزی موجود در منطقه در طی فعالیت حداقل ۲۰ سال باشد،

- دارای حرکت به سمت آب‌های زیرزمینی باشد،

- با بارش باران، نترات شسته شده به آب‌های زیرزمینی وارد گردد،

- به‌نسبت به‌طور یکنواخت در منطقه پخش شده باشد (آلاینده به‌صورت نقطه‌ای پخش نشده باشد)،

در این پژوهش در راستای رسیدن به این هدف براساس آزمون رتبه‌ای ویلکاکسون<sup>۱</sup> عمل شده است. به این صورت که ابتدا پارامترهایی که دارای دامنه‌های متفاوت می‌باشد، انتخاب می‌شوند. در مرحله بعدی دامنه اصلی و ابتدایی هر پارامتر مقابل آن نوشته می‌شود. آزمون ویلکاکسون از آزمون‌های آماری ناپارامتری است که برای ارزیابی همانندی دو نمونه وابسته با مقیاس رتبه‌ای به کار می‌رود. آزمون ویلکاکسون علاوه بر در نظر گرفتن علائم اختلاف، مقدار تفاوت آن‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. بنابراین چون اطلاعات بیش‌تری را مورد استفاده قرار می‌دهد دارای جواب دقیق‌تری نسبت به آزمون‌های دیگر مانند آزمون علامت است. بعد از واسنجی مدل، تحلیل حساسیت مدل دراستیک انجام شد در تعیین حساسیت میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترهای به کار برده شده، با استفاده از دو نوع تحلیل حساسیت حذف پارامتر (لودویک و همکاران، ۱۹۹۰) و تحلیل حساسیت تک پارامتری (ناپلیتانو و فابری، ۱۹۹۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل حساسیت، حذف پارامتر حساسیت نقشه آسیب‌پذیری را به حذف یک یا چند پارامتر نشان می‌دهد و از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$S = \frac{|(V/N) - (V'/n)|}{V} \times 100 \quad (2)$$

که در آن،  $S$ : حساسیت‌پذیری،  $V$ ،  $V'$ : به ترتیب شاخص غیرآشسته (شاخص واقعی و بدون حذف پارامتر) و شاخص آشسته شاخص آسیب‌پذیری با حذف پارامتر،  $N$  و  $n$ : نیز تعداد لایه‌های مورد استفاده  $V$ ،  $V'$  می‌باشد (بایبکر و همکاران، ۲۰۰۵).

تحلیل حساسیت تک پارامتری، تأثیر هر یک از پارامترهای دراستیک را در شاخص نهایی آسیب‌پذیری بررسی می‌کند. در این تحلیل وزن مؤثر یا واقعی هر پارامتر با وزن تئوری اختصاص یافته به آن در مدل دراستیک مقایسه می‌شود و با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید (بایبکر و همکاران، ۲۰۰۵).

$$W = (P_r P_w / V) \times 100 \quad (3)$$

که در آن،  $W$ : وزن مؤثر هر پارامتر،  $P_r$  و  $P_w$ : به ترتیب نمره و وزن هر کدام از پارامترها و  $V$ : اندیس نهایی آسیب‌پذیری می‌باشد. وزن مؤثر تابعی از مقدار یک پارامتر با توجه به سایر پارامترها همانند وزن اختصاص یافته به آن می‌باشد. تحلیل حساسیت تک پارامتری وزن‌های مؤثر و تئوریک پارامترها را با هم مقایسه می‌کند و مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری را مشخص می‌کند.

1- Wilcoxon Rank-Sum Nonparametric Statistical Test

## نتایج

**نقشه شاخص آسیب‌پذیری:** با توجه به روش کار تهیه نقشه آسیب‌پذیری همچنین با توجه به رابطه ۱ و نقشه به‌دست آمده شاخص آسیب‌پذیری برای دشت سلفچگان بین ۱۶۴-۶۰ محاسبه گردید. برای درک بهتر و نشان دادن وضعیت آسیب‌پذیری منطقه، شاخص آسیب‌پذیری مطابق جدول ۸ به ۴ کلاس (رده) طبقه‌بندی شد و در نهایت نقشه نهایی آسیب‌پذیری منطقه به‌دست آمد (شکل ۳). براساس نقشه نهایی آسیب‌پذیری استعداد آلودگی دشت سلفچگان در دو محدوده آسیب‌پذیری کم تا متوسط قرار می‌گیرد. از نظر وسعت نیز حدود ۵۱ و ۳۳ درصد از مساحت منطقه به‌ترتیب در محدوده آسیب‌پذیری خیلی کم و کم قرار می‌گیرد که بیش‌تر قسمت‌های مرتفع محدوده مطالعاتی را تشکیل می‌دهد. محدوده آسیب‌پذیری متوسط و بالا که به‌ترتیب حدود ۱۵ و ۰/۵ درصد از مساحت منطقه را در بر می‌گیرد بیش‌تر در اراضی کشاورزی و کم‌شیب منطقه واقع می‌شوند.

پس از محاسبه شاخص می‌توان گفت که کدام منطقه در خطر آلودگی قرار دارد. به این صورت که هرچه شاخص بزرگ‌تر باشد، خطر ایجاد آلودگی بیش‌تر می‌گردد (جدول ۲). باید توجه داشت که شاخص دراستیک تنها یک ابزار ارزیابی نسبی را تهیه می‌کند و قابلیت ارزیابی مطلق را ندارد. هر کدام از لایه‌های بالا با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 9.2 تهیه و طبق جدول ۱ رتبه‌دهی و وزن‌دهی براساس نظر کارشناسی صورت گرفت این وزن‌ها بین صفر و یک بود و نرمالیز گردید. در نهایت طبق رابطه ۱ هم‌پوشانی شدند و بعد از طبقه‌بندی براساس جدول ۲، نقشه آسیب‌پذیری به روش دراستیک به‌دست آمد (شکل ۳).

**واسنجی مدل دراستیک:** همان‌طوری‌که در بخش قبل نیز به آن اشاره گردید، برای تعیین حریم کیفی یک آب‌خوان، علاوه بر نقشه آسیب‌پذیری، به کاربری و پارامتر آلودگی که آن کاربری ایجاد می‌کند، نیاز می‌باشد.

همچنین این روش تنها بیانگر آسیب‌پذیری ذاتی آب‌خوان بوده و به‌طور دقیق و مستقل نمی‌تواند خطر ناشی از آلاینده‌ها را نشان دهد. از طرفی برای تعیین حریم کیفی یک آب‌خوان لازم است تا پارامتر آلودگی نیز در آن دخیل داده شود.

در این قسمت از پژوهش با توجه به این‌که توزیع آلودگی به‌صورت غیرنقطه‌ای می‌باشد (از نظر کاربری کشاورزی)، با استفاده از یک پارامتر آلودگی، بسته به نوع کود استفاده شده و کاربری محدوده و نقشه آسیب‌پذیری، این امکان فراهم آمد که پتانسیل آلوده شدن و حریم کیفی محدوده سلفچگان با دقت



بالاتری تعیین شود. در این روش، با استفاده از روش‌های آماری و زمین‌آماری، وزن‌ها و رتبه‌بندی‌های شاخص دراستیک در محیط GIS اصلاح گردید. همچنین معیار این اصلاحات، همبستگی هر پارامتر با غلظت نیترات اندازه‌گیری شده در آب زیرزمینی یا آب‌خوان موردنظر بوده است.

از آن‌جا که نقشه آسیب‌پذیری محدوده مطالعاتی با استفاده از ۷ پارامتر موجود استخراج شده است در ادامه با توجه به کاربری کشاورزی و نمونه‌های نیترات جمع‌آوری شده در منطقه، حریم کیفی محدوده تعیین خواهد شد. در این پژوهش به‌منظور واسنجی مدل و کاهش نظرات شخصی در انتخاب وزن‌های هر لایه و به‌دست آوردن بهترین ترکیب وزنی، از مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده در چاه‌های محدوده مطالعاتی استفاده شده است. به این منظور بیش از ۳۶ نمونه آب از آب‌خوان تهیه و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفته است. با رعایت ملاحظات و انجام سعی و خطا بهترین ترکیب وزنی لایه‌های اطلاعاتی به‌دست آمده و براساس این وزن‌ها نقشه شاخص دراستیک محدوده مطالعاتی ارایه گردیده است. در مرحله بعد به‌منظور ارایه رده‌بندی مناسب در مدل دراستیک، از رده‌بندی کیفیت آب براساس یون نیترات استفاده شده، رده‌بندی جدید برای مدل دراستیک ایجاد و براساس آن مدل دراستیک واسنجی شده آب‌خوان رده‌بندی گردید.

**ایجاد رابطه همبستگی بین دو پارامتر آسیب‌پذیری و نیترات:** در این قسمت از پژوهش به اصلاح و واسنجی مدل پرداخته تا در ادامه بتوان پتانسیل آلوده شدن محدوده سلفچگان- نی‌زار و حریم کیفی آن را با دقت بیش‌تری تخمین زد.

خوشبختانه می‌توان عنوان نمود که اندازه‌گیری‌های نیترات در منطقه شامل موارد بالا می‌شود و شرایط استفاده را برای تعیین حریم کیفی خواهد داشت.

در ادامه برای ایجاد رابطه همبستگی از اطلاعات ۳۶ چاه نمونه‌گیری، استفاده شده است و سپس نقاط بر روی نقشه آسیب‌پذیری پخش گردید با توجه به همبستگی پایین بین آلودگی نقاط و نتایج مدل برای بالا بردن دقت در تعیین حریم کیفی محدوده باید یک پارامتر آلاینده نیز وارد شود و تأثیر این پارامتر به همراه آسیب‌پذیری ذاتی آب‌خوان می‌تواند تشکیل یک حریم کیفی نزدیک به واقعیت را بدهد. لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موجود و شناخته شده و همچنین در نظر گرفتن آلاینده‌های مختلف در تعیین حریم، باز هم به‌طور یقین نمی‌توان ادعا نمود که حریم کیفی آب‌خوان مطلق می‌باشد. زیرا همان‌طور که می‌دانید در روابط بین آب و مواد آلاینده با خاک همواره پیچیدگی‌های خاصی وجود داشته که یا شناخته شده نمی‌باشند یا با فرض‌هایی از آن عبور شده است.

پس از آن‌که مشخص شد میزان همبستگی بین آسیب‌پذیری و آلاینده نیترات کم می‌باشد، می‌بایست راه‌کاری ارائه شود تا این میزان آن افزایش یابد. در این پژوهش در راستای رسیدن به این هدف براساس آزمون رتبه‌ای ویلکاکسون عمل شده است. سپس از مقادیر نیترات بر روی نقشه آسیب‌پذیری در هر دامنه، میانگین‌گیری می‌شود. به‌طور نمونه در مورد عمق سطح آب، در دامنه بین ۰-۱/۵ متر از داده‌های نیترات موجود در نقشه میانگین‌گیری شده است (مقدار ۴/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر). در گام بعدی براساس آزمون ویلکاکسون به پارامتری که دارای بیش‌ترین میزان غلظت نیترات است، بالاترین رتبه داده می‌شود و بقیه رتبه‌ها براساس رتبه این پارامتر اصلاح می‌گردد. به‌طور نمونه پارامتر تغذیه را در نظر گرفته، دامنه سوم آن (۱۷۷/۸-۱۰۱/۶ میلی‌متر) با رتبه ۶ دارای بیش‌ترین میانگین غلظت نیترات می‌باشد، بنابراین در اصلاح رتبه بالاترین مقدار رتبه یعنی عدد ۱۰ را به خود می‌گیرد و بقیه دامنه‌ها با توجه به این مقدار اصلاح خواهند شد.

پس از اصلاح دامنه هر پارامتر، این بار نقشه حریم کیفی محدوده در نرم‌افزار ArcGIS با نوار ابزار Raster Calculator استخراج و مقادیر نیترات نیز روی آن پخش گردید با بالا رفتن همبستگی بین آلودگی نیترات در منطقه و نقاط حساسیت‌پذیر قسمت‌هایی که میزان غلظت نیترات در آن افزایش یافته، شاخص آسیب‌پذیری نیز مقادیر بیش‌تری را نشان می‌دهد. بنابراین براساس یک پارامتر آلودگی و آسیب‌پذیری ذاتی، نقشه حریم کیفی یک محدوده استخراج گردید (شکل ۳).

**تحلیل حساسیت روش آسیب‌پذیری دراستیک در محیط GIS.** آنالیز حساسیت یک گام اساسی در این مدل کاربردی می‌باشد. در طی این مرحله، پارامترهای ورودی مدل تغییر داده می‌شوند و عکس‌العمل سیستم نسبت به این تغییرات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نتیجه میزان حساسیت هر پارامتر مشخص می‌شود.

در این پژوهش ابتدا ضریب همبستگی بین پارامترهای مدل دراستیک محاسبه شد که در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج تحلیل همبستگی بین پارامترهای مدل دراستیک جدول ۹ نشان می‌دهد که یک رابطه قوی بین پارامترهای محیط خاک و تغذیه خالص (ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۶) وجود دارد که احتمالاً به دلیل تأثیر مستقیم نقشه خاک در تهیه لایه تغذیه خالص می‌باشد. ولی بین سایر پارامترهای مدل همبستگی مهمی مشاهده نمی‌شود. حتی بین بعضی از پارامترها همبستگی منفی وجود دارد که نشان‌دهنده افزایش یکی از پارامترها در مقابل کاهش پارامتر دیگر است، مثلاً همبستگی بین پارامترهای عمق سطح ایستابی و هدایت هیدرولیکی. بدیهی است که سطوح ایستابی عمیق‌تر (نمره پایین‌تر) در مناطقی دیده می‌شوند که هدایت هیدرولیکی در آن منطقه بالا (نمره بالاتر) باشد.

## جعفر احمدی و همکاران

جدول ۹- ماتریس همبستگی پارامترهای دراستیک.

C	I	T	S	A	R	D	
						۰	D
					۰	۰	R
				۰	۱	۱	A
			۰	۱	۷	۲	S
		۰	۱	۱	۲	۰	T
	۰	۰	۳	۱	۳	۱	I
۰	۳	۰	۴	۰	۳	۲	C

نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت تک پارامتری مدل دراستیک در جدول ۱۰ ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که وزن مؤثر و تئوریک پارامترهای دراستیک کاملاً بر هم منطبق نیستند جدول ۱۰ و در بعضی موارد تفاوت‌های قابل توجهی با هم دارند.

جدول ۱۰- نتایج آماری تحلیل حساسیت به روش تک پارامتری.

پارامتر	وزن تئوریک	وزن مؤثر (درصد)			وزن تئوریک (درصد)	انحراف معیار (درصد)
		کمینه	بیشینه	میانگین		
D	۵	۳/۳	۴۸/۵۴	۲۴/۳۳	۲۱/۷	۷/۱۱
R	۴	۴/۵۱	۲۴/۳۴	۱۲/۴	۱۷/۴	۴/۸۸
A	۳	۰/۵۵	۱۳/۷۷	۶/۵	۱۳	۱/۸
S	۲	۱۲/۸۶	۴۰/۳	۲۰/۹۲	۸/۷	۵/۶۷
T	۱	۱/۲۳	۲۹/۸	۱۴/۲	۴/۳	۵/۸
I	۵	۳/۲۲	۲۲/۲	۸/۵	۲۱/۷	۳/۳۳
C	۳	۲۹/۷۸	۲۶/۹۴	۱۳/۳	۱۳	۴/۷

با توجه به جدول ۱۰، پارامتر عمق تا سطح ایستایی به عنوان مؤثرترین پارامتر در ارزیابی آسیب پذیری می‌باشد (میانگین وزن مؤثر ۲۴/۳۳ درصد) میانگین وزن مؤثر این پارامتر کمی بیش از وزن تئوریک اختصاص داده شده به آن توسط مدل دراستیک می‌باشد. پارامتر خاک و توپوگرافی نیز وزن مؤثر بیشتری را از وزن تئوریک نشان می‌دهد و این می‌تواند به دلیل وسعت زیاد محدوده با نمره

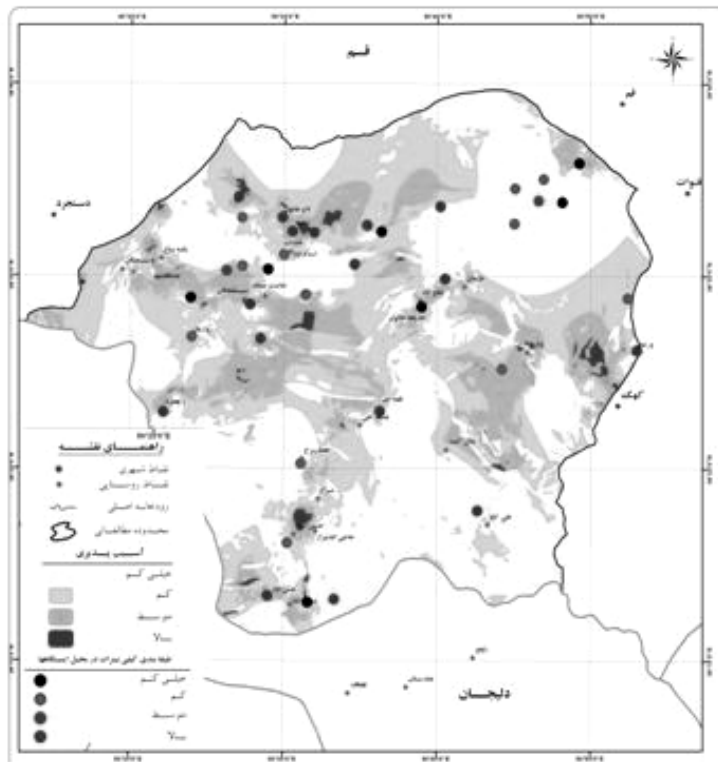
بالا برای پارامترهای نام برده، باشد. وزن مؤثر و تئوریک پارامتر هدایت هیدرولیکی تقریباً بر هم منطبق هستند. ولی پارامترهای محیط آب‌خوان، تغذیه خالص و ناحیه غیراشباع وزن مؤثر کم‌تری نسبت به وزن تئوریک اختصاص داده شده به آن‌ها توسط مدل دراستیک نشان می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای نام برده تأثیر کم‌تری بر روی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، در مقایسه با مدل تئوریک دراستیک دارند و در عوض پارامترهای عمق تا سطح ایستابی، خاک و توپوگرافی در مقایسه با فرضیه‌های مدل دراستیک تأثیر بیش‌تری را بر روی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه دارند. اما تأثیر دیگر پارامترهای شاخص دراستیک بر روی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، مانند فرضیه‌های مدل دراستیک می‌باشد.

جدول ۱۱- نتایج آماری تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر.

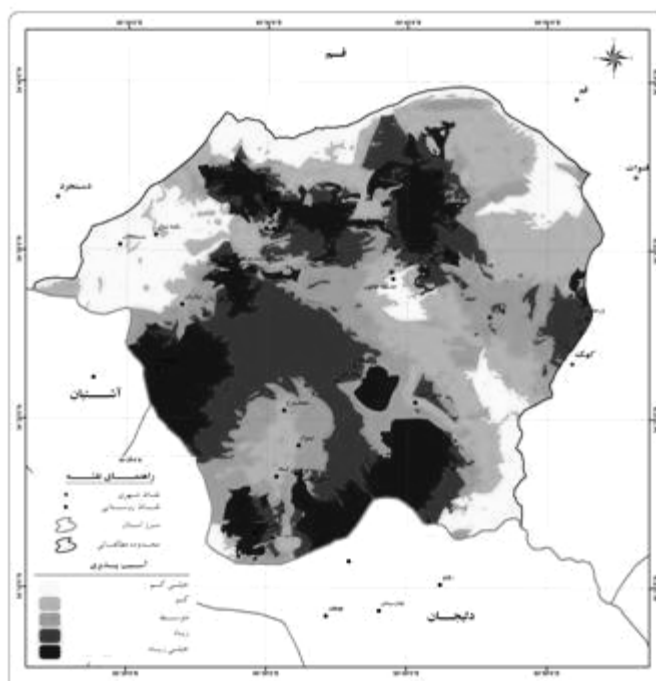
پارامتر حذف شده	شاخص تغییرات %/۰			معیار انحراف
	میانگین	حداقل	حداکثر	
D	۱/۷۷	۰	۳	۰/۶۳
R	۰/۰۷	۰	۱	۰/۲۶
A	۰/۰۳	۰	۱	۰/۲۲
S	۰/۷۹	۰	۳	۰/۷۱
T	۰/۶۲	۰	۲	۰/۶۹
I	۰/۰۶	۰	۱	۰/۲۶
C	۰/۶۱	۰	۳	۰/۵۶

نتایج آماری به‌دست آمده از آنالیز حساسیت به روش حذف پارامتر نشان می‌دهد که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی شاخص آسیب‌پذیری، عمق سطح ایستابی است که با میانگین ضریب حساسیت ۱/۷۷ دارای بالاترین ضریب حساسیت می‌باشد (جدول ۱۱). پس از آن بیش‌ترین تأثیر را به‌ترتیب، پارامترهای خاک، توپوگرافی، هدایت هیدرولیکی، محیط آب‌خوان، محیط غیراشباع و محیط خاک دارند. نتایج آماری به‌دست آمده از آنالیز حساسیت به روش تک‌پارامتری نیز نشان می‌دهند که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی شاخص آسیب‌پذیری، خاک است که با میانگین ۲۴/۳۳ بیش‌ترین وزن مؤثر را دارا می‌باشد.

تحلیل حساسیت به روش تک‌پارامتری وزن مؤثر هر پارامتر را با وزن تئوری آن پارامتر مقایسه می‌کند. مقایسه وزن مؤثر هر پارامتر با وزن تئوری اختصاص داده شده به آن در آب‌خوان دشت سلفچگان- نی‌زار نشان می‌دهد که وزن مؤثر و تئوری پارامترهای دراستیک کاملاً بر هم منطبق نیستند. به‌عنوان مثال وزن تئوری خاک ۸/۷ درصد و وزن مؤثر آن ۲۴/۳۳ درصد می‌باشد. در انتها وضعیت کیفی آلودگی شاخص کشاورزی (نترات) در محل ایستگاه‌ها با توجه به نقشه آسیب‌پذیری بعد از اصلاح مدل (شکل ۴) ارائه گردید.



شکل ۳- وضعیت کیفی آلودگی شاخص کشاورزی (نترات) در محل ایستگاه‌ها با توجه به نقشه آسیب‌پذیری قبل از اصلاح مدل.



شکل ۴- وضعیت کیفی آلودگی شاخص کشاورزی (نیترات) در محل ایستگاه‌ها با توجه به نقشه آسیب‌پذیری بعد از اصلاح مدل.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مطالعه موردی نشان می‌دهد که تا قبل از وارد نمودن آلاینده و اصلاح پارامترهای مدل، مقادیر آسیب‌پذیری همبستگی بسیار کمی را با آلودگی نشان می‌داد (در حدود ۱۹ درصد)، اما پس از در نظر گرفتن غلظت نیترات موجود در منطقه و متناسب با آن، اصلاح پارامترهای مدل با آزمون رتبه‌ای ویلکاکسون، میزان همبستگی مدل با آلودگی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته (در حدود ۶۴ درصد) و حتی میزان آن نیز با حدود اطمینان ۹۶ درصد معنی‌دار می‌باشد.

به‌طور کلی وضعیت حریم‌های کیفی مربوط به مصارف کاربری‌های کشاورزی (نواحی حساس به آلودگی نیتراته مطابق شکل ۲)، مساحت‌های مختلفی را در محدوده مطالعاتی تحت پوشش قرار داده است. ادامه تراکم‌های مربوط به کاربری‌های مشابه در هر یک از محدوده‌های با حساسیت‌پذیری متوسط به بالا موجبات افزایش آلودگی‌های شاخص مربوط به کاربری‌های نام برده در منطقه می‌شود،

به این لحاظ پیشنهاد می‌گردد در درجه اول نسبت به کنترل آلودگی‌های واقع در منطقه (مطابق با اقدامات ارایه شده در گزارش تدوین برنامه پایش برای مدیریت کیفی، کنترل و پیش‌گیری از آلودگی منابع آب محدوده مطالعاتی) اقدام گردد و در درجه دوم تا حد امکان از گسترش و تمرکز مربوط به اراضی وابسته به آلودگی‌های منطقه‌ای ارایه شده در شکل‌های حریم کیفی به‌خصوص در مناطق با تقسیم‌بندی خطرناک و بحرانی ررسی‌های کارشناسی بیش‌تری صورت پذیرد.

نتایج مربوط به حریم‌های مختلف کیفی نشان می‌دهد در ۴ رده حریم‌های خیلی کم، کم، متوسط، بالا قرار داشته که به‌ترتیب قبل از تصحیح مدل ۵۵۰، ۸۵۳، ۱۵۰ و ۴۹۸ کیلومترمربع و بعد از تصحیح مدل مقادیر نام برده به‌ترتیب ۳۵۱، ۴۸۶، ۴۰۱، ۴۲۵ و ۴۰۴ کیلومترمربع بوده که بازه‌های مربوط به حریم‌های کیفی خیلی بالا به ۴۰۴ کیلومترمربع نیز به بازه‌های اولیه اضافه شده است.

با تحلیل حساسیت تک‌پارامتری روش DRASTIC مشخص شد که پارامتر عمق تا سطح ایستابی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری آب‌خوان دشت سلفچگان- نی‌زار می‌باشد. همچنین پارامترهای محیط آب‌خوان، تغذیه خالص و اثر ناحیه غیراشباع تأثیر کم‌تری بر روی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، در مقایسه با مدل تئوریک دراستیک دارند. به‌طورکلی نتایج تحلیل حساسیت تک‌پارامتری در این روش نشان داد که که وزن مؤثر و تئوریک پارامترهای به‌کار رفته، کاملاً بر هم منطبق نیستند و در بعضی موارد تفاوت‌های قابل‌توجهی با هم دارند.

## منابع

1. Akhtari, Y. 2007. Evaluation of aquifer pollution potential model Zvyrchry and Kheran using DRASTIC, M.Sc. Thesis, Department of Geology, Shahid Chamran University, 170p.
2. Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings: NWWA/EPA Series, EPA/600/2-7/035. P 19-25, U.S. Environmental Protection Agency. Ada. Oklahoma.
3. Almasri, M.N. 2008. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine.
4. Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiyama, T., and Kato, K. 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, Central Japan. Science Total Environment, 345: 127-140.
5. Gogu, R.C., and Dassargues, A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods, Environmental Geology, 39: 549-559.

6. Hamza, M.H. 2010. Validity of the vulnerability methods DRASTIC and SI applied by GIS technique to the study of diffuse agricultural pollution in two phreatic aquifers of a semi-arid region (Northeast of Tunisia) AQUAmundi-Am01009. Pp: 57-64.
7. Iran's Ministry of Water Resources Management. 2010. Instructions to determine groundwater quality privacy, 379p.
8. Khodaei, K., Shamsavari, B., and Etebari, B. 2007. Aquifer vulnerability assessment methods, GOD and DRASTIC, Iran. J. Geol. 4: 73-87. (In Persian)
9. Knodel, K., Lange, G., and Voigt, H.J. 2007. Environmental Geology, Handbook Field Methods and Case Studies, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1357p.
10. Lar Consulting Engineers. 2010. Determined of quality boundary of the aquifers.
11. Lodwick, W.A., Monson, W., and Svoboda, L. 1990. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. Int. J. Geogr. Inf. Syst. 4: 4. 413-428.
12. Napolitano, P., and Fabbri, A.G. 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACSHydroGIS 96: application of geographical information systems in hydrology and water resources management. Proceedings of Vienna Conference. IAHS Pub, 235: 559-566.
13. Rahman, A. 2008. A GIS Based DRASTIC model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh, India, Applied Geography, 28: 32-53.
14. Rosen, L. 1994. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions, Ground Water, 32: 2. 278-85.
15. Vrba, J., and Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International Contribution for Hydrogeology, Hannover Heise, 16p.
16. Yarmohammadi, E., and Chitsazan, M. 2006. Assessment of aquifer vulnerability Potential using DRASTIC and SINTAC Aghili used in GIS, M.Sc. Thesis, Department of Geology, Shahid Chamran University, 160p.
17. Yarmohammadi, E. 2007. *Potential aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS Aghili used in GIS*, 1385.





Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(3), 2013*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Determination of aquifer vulnerability using DRASTIC model and a single parameter sensitivity analysis and acts and omissions (Case Study: Salafchegan-Neyzar Plain)**

**J. Ahmadi<sup>1</sup>, L. Akhondi<sup>2</sup>, H. Abbasi<sup>3</sup>, \*A. Khashei-Siuki<sup>4</sup>  
and M. Alimadadi<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>B.Sc., Dept. of Civil Engineering, Shahid Abbaspour University, <sup>2</sup>M.Sc., Dept. of  
Chemistry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, <sup>3</sup>Ph.D. Student, Dept.  
of Applied Biological Sciences, Environmental Technology, Ghent University, Belgium,

<sup>4</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Birjand, <sup>5</sup>B.Sc., Dept. of  
Geology, Ferdowsi Mashhad of University

Received: 05/06/2012; Accepted: 09/15/2012

### **Abstract**

Nowadays one of the solutions to protect aquifers in developed countries is to prevent contamination of aquifers. In this study Salafchegan-Neyzar Aquifer vulnerability against agricultural pollution was evaluated, by Drastic and GIS models. In this method, seven hydrogeological factors that were effective in groundwater pollution were combined. The seven factors are: watertable depth, the net recharge aquifer, aquifer media, soil media, topography and the unsaturated hydraulic conductivity. Vulnerability zoning maps were drawn from the results obtained. Zones vulnerable to nitrate pollution were determined. Using GIS techniques and by single-parameter sensitivity analysis, the influence of parameters used were investigated. Results showed that depth to water table aquifer of Salafchegan was the most important factor influencing vulnerability in Salafchegan-Neyzar aquifer. The results of different qualitative zones was shown in four categories of very low, low, medium, high which were 550, 853, 150 and 498 square kilometers before the correction of model were converted to 351, 486, 401 and 425 after the model correction. In general, sensitivity analysis showed that effective and theoretical weight of using parameters, aren't fully coincide and in some cases have considerable differences.

**Keywords:** Geographic information system (GIS), DRASTIC, Aquifer of Salafchegan-Neyzar, Vulnerability, Sensitivity analysis

---

\* Corresponding Author; Email: [abbaskhashei@birjand.ac.ir](mailto:abbaskhashei@birjand.ac.ir)