**مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره دهم، شماره ۲۹، پاییز ۱۴۰۰**

**تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱**

**تاریخ بازنگری نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲**

**تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱**

**صفحات: ۱۶۰ – ۱۴۵**

**مقاله (علمی پژوهشی)**

# ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت قزوین با استفاده از روش DRASTIC-AHP مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی

**عبدالله طاهری تیزرو*[۱]، میلاد قلعه‌بان تکمه‌داش[۲]، فاطمه فرجی[۳]**

۱*. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا

۲. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه بوعلی‌سینا

۳. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه بوعلی‌سینا

## چکیده

**آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌دلیل فعالیت‌های بشری، یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در مناطق صنعتی و کشاورزی است. آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی آب شرب در کشور ما است؛ بنابراین بررسی آسیب‌پذیری این منابع اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق روش اصلاح‌شده DRASTIC براساس سیستم اطلاعات جغرافیایی برای مطالعه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در دشت قزوین استفاده شده است. با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی ضرایب مربوط به هر پارامتر از روش DRASTIC تعیین شدند. از تحلیل رگرسیون خطی برای ارزیابی ارتباط آماری بین غلظت آلاینده‌های آب زیرزمینی و مناطق آسیب‌پذیر آن استفاده شد. نقشه‌ی آسیب‌پذیری حاصله نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست‌آمده از روش DRASTIC با شاخص‌های کیفی موردنظر تطابق نسبی دارد و نتایج مشابه برای روش DRASTIC-AHP نیز به‌دست آمد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی نشان داد که در شرق منطقه آسیب-پذیری و پتانسیل آلودگی هر دو سطح بالایی داشته و خطر آلودگی آب زیرزمینی در این مناطق از سایر نقاط بیشتر است. با برقراری رابطه رگرسیون میان شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی و روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری به تفکیک میزان دقت روش‌ها بررسی شد. مشخص گردید که روش DRASTIC-AHP از دقت بالاتری نسبت به روش سنتی آن برخوردار است و تطابق بیشتری با شاخص‌های کیفی واقع شده در منطقه دارد.**

**واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، آلودگی، آب زمین‌شناسی، تحلیل سلسله مراتبی.**

*- عبدالله طاهری تیزرو (نویسنده مسئول) Email: ttizro@Basu.ac.ir

**مقدمه**

آب زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که به‌دلیل حجم ذخیره زیاد و آسیب‌پذیری کمتر آن به آلاینده‌ها در مقایسه با آب‌های سطحی موردتوجه مصرف‌کنندگان آب قرار می‌گیرد. به‌دلیل جمعیت زیاد و توسعه صنعت مقادیر قابل‌توجهی از آلاینده‌های شهری و صنعتی به آب زیرزمینی تخلیه می‌شود که منجر به آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌گردد. انواع مختلفی از آلاینده‌ها که به‌صورت غالب در آب زیرزمینی وجود دارد شامل، فلزهای سنگین، مواد غذایی، آفت‌کش‌ها و سایر مواد شیمیایی آلی و کودها است. نشت آلاینده‌های متعدد از طریق محیط غیر اشباع باعث بالاآمدن آلاینده‌ها می‌شود. فرآیندهای نشت از محلی به محل دیگر متفاوت است.

جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی برای مدیریت مؤثر منابع آب و ارزیابی آسیب‌پذیری جهت حفاظت از آب زیرزمینی اهمیت دارد. روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، منطقه جغرافیایی را به مناطق فرعی تقسیم می‌کند تا از این طریق روش‌های مدیریت و حفاظت از منابع آب در مناطق حساس‌تر با سرعت و دقت بیشتری صورت گیرد. در مطالعات گذشته از جمله تاکی رضوان، خلقی و روشنی (۱۳۸۸) به دو نوع آسیب‌پذیری اشاره شده است، الف) ذاتی (طبیعی) و ب) ویژه (یکپارچه). آسیب‌پذیری ذاتی عبارت‌است از، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلاینده‌های حاصل از فعالیت‌های بشری با در نظرگرفتن شرایط ذاتی جغرافیایی، آب‌شناسی[1] و خصوصیت‌های شیمیایی ساختارهای زمین‌شناسی آن منطقه. آسیب‌پذیری ویژه، برای تعریف آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلاینده‌های خاصی با در نظرگرفتن خصوصیت‌های آلاینده و ارتباط آن با اجزای متعدد آسیب‌پذیری ذاتی بکار می‌رود (عزیزی مبصر و همکاران، ۱۳۹۷).

در کل، روش‌های پوشش و شاخص برای تعیین آسیب‌پذیری آب زیرزمینی تقریباً مؤثر هستند. این روش‌ها مخصوصاً برای سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی مناسب‌اند؛ چون این روش‌ها شامل همپوشانی و تجمیع نقشه‌های مختلفی هستند. یک روش همپوشانی و شاخص، یک مدل چند معیاره است که فاکتورهای هیدروژئولوژیک را تجمیع می‌کند تا انتقال آلاینده‌ها به آبخوان را کنترل کنند. این روش‌ها فاکتورهای کنترل‌کننده حرکت آلاینده‌ها از سطح زمین به ناحیه اشباع منجر به ایجاد شاخص‌هایی در مناطق مختلف می‌شود. مدیریت کیفی آب‌های زیرزمینی در گام اول مستلزم شناخت کافی منشأ آلاینده‌های آبخوان[2] است. بدون شک بهترین حالت شناخت رفتارهای یک منطقه آب زیرزمینی، تحقیقات دراز مدت برای هر منطقه است که عملاً غیرممکن است. بااین‌حال، می‌توان با اندازه‌گیری‌های دقیق به شاخص‌های قابل‌قبولی دست یافت. مزیت اصلی این است که برخی از فاکتورهای مانند بارندگی و عمق آب زیرزمینی، می‌تواند در مناطق بزرگ در دسترس باشد و این مزیت این امکان را فراهم می‌آورد تا ارزیابی‌ها در مقیاس منطقه‌ای انجام گیرد؛ اما اشکال اصلی این روش‌ها، مشکل اختصاص‌دادن مقادیر به ویژگی‌های کیفی و وزن‌های نسبی خصوصیت‌های مختلف است.

در سال‌های اخیر مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی رشد سریعی داشته است و روش‌های جدیدی در این راستا ارائه شده است. یکی از پر استفاده‌ترین استانداردهای روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، DRASTIC است که توسط مؤسسه‌ی حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده‌آمریکا توسعه یافته و جهت ارزیابی آلودگی بالقوه آب‌های

1 Hydrology
2 Aquifer

زیرزمینی استفاده می‌شود. (جوادی و همکاران، ۱۳۹۰). این روش از هفت پارامتر در محاسبات خود استفاده می‌کند تا شاخص آسیب‌پذیری را محاسبه کند. برخی از محققان از جمله بابیکر[1] و همکاران (۲۰۰۵) گوگا[2] و داسارگوس[3] (۲۰۰۰)؛ آل‌زابت[4] (۲۰۰۲)؛ شلاسر و همکارن (۲۰۰۱)؛ تیرومالاواسان[5] و کارمگام[6] (۲۰۰۳)؛ تاکی رضوان، خلقی و روشنی (۱۳۸۸) تلاش کرده‌اند تا شاخص آسیب‌پذیری را با پارامترهای آلاینده مرتبط سازند و یا ارزیابی را با تحلیل حساسیت کنترل کنند. همچنین در سال‌های اخیر، روش DRASTIC بر اساس خصوصیت‌های منطقه موردمطالعه بااستفاده از اضافه‌کردن پارامترهای مهم یا حذف برخی از پارامترهای کم اهمیت اصلاح شده است.

دشت قزوین یکی از مناطق مستعد آسیب‌پذیری از لحاظ آلودگی آب‌های زیرزمینی است. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، استفاده از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در مزارع و فعالیت‌های صنعتی در این منطقه باعث ایجاد آسیب‌هایی شده است. بر اساس گزارش دفتر مطالعات آب منطقه‌ای استان قزوین (۱۳۸۹)، سالانه بیش‌از ۲۰۰ میلیون مترمکعب از این دشت اضافه برداشت صورت می‌گیرد. مجموع تغذیه آبخوان حدود ۱۲۶۰ میلیون مترمکعب است؛ اما مجموع تخلیه آبخوان به حدود ۱۴۶۰ میلیون مترمکعب می‌رسد. زمین‌های آبرفتی منطقه به غیر از منطقه شوره‌زارها، دارای نفوذپذیری نسبتاً بالایی بوده و هر نوع مواد زائدی که در سطح زمین تولید شود در اثر بارندگی و یا مجاورت با منابع آبی در داخل زمین نفوذ کرده و مخازن آب‌های زیرزمینی که به‌صورت پیوسته و وسیع در منطقه گسترش دارند، آلوده می‌گردند (تاکی رضوان و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری دشت قزوین ازنظر حفاظت از کمیت و کیفیت آب زیرزمینی، اهمیت بسزایی دارد. در مطالعات قبل، از روش DRASTIC در دشت قزوین به‌صورت مستقیم و بدون تغییر استفاده شده است، ازاین‌رو، خصوصیت‌های خاص منطقه در ارزیابی‌ها کمتر موردتوجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش ارزیابی تغییرات خصوصیت‌های منطقه است.

در این تحقیق سعی شده است روش سابق از طریق فن اصلاح‌شده DRASTIC مبتنی به سیستم اطلاعات جغرافیایی به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی بهبود یابد و به‌صورت ویژه برای دشت قزوین استفاده گردد. از سایر اهداف این تحقیق، استخراج نقشه آسیب‌پذیری با روش سنتی DRASTIC و مقایسه آن با نتایج حاصل از روش اصلاح شده است. از این طریق تفاوت روش بهبودیافته با روش سابق مشخص می‌شود.

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه موردمطالعه

منطقه مورد بررسی از نقطه‌نظر تقسیمات کشوری بخشی از استان قزوین را شامل می‌شود که در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غربی تهران قرار گرفته است. محدوده موردبررسی قزوین بین طول‌های شرقی ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه و ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه و ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه جغرافیایی قرار گرفته است و ارتفاع بیشینه برابر ۲۹۷۱ متر و کمینه ۱۱۰۰ متر و میانگین منطقه حدود ۱۲۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد. کل

1 Babiker
2 Gogu
3 Dassargues
4 Zabet-Al
5 Thirumalaivasan
6 Karmegam

حوضه آبریز ۹۳۷۶ کیلومتر مربع مساحت دارد که ۳۸۴۲ کیلومتر آن را دشت و باتلاق تشکیل داده است. آمار و داده-های جمع‌آوری‌شده در منطقه نشان می‌دهد که آلودگی محیط زیست در منطقه در جهت‌های مختلف در حال گسترش است و مهم‌ترین آلودگی را می‌توان در منابع آلودگی آب و آلودگی ناشی از جمع‌آوری و دفع زباله و منابع آلوده‌کننده کشاورزی دانست (تاکی رضوان و همکاران، ۱۳۸۸).

**روش ارزیابی آسیب‌پذیری**

در مرحله اول روش DRASTIC مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه موردمطالعه استفاده شد. روش DRASTIC بر اساس مفاهیم هیدروژئولوژیک به شکل ترکیبی از تمام فاکتورهای زمین‌شناسی و آب‌شناسی مؤثر در کنترل حرکت آب‌های زیرزمینی استفاده می‌کند. واژه DRASTIC مخفف هفت پارامتر استفاده شده در این مدل است که عبارت‌اند از: عمق آب، تغذیه خالص، جنس آبخوان، جنس خاک، توپوگرافی، اثر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی. انواع قابل‌توجه و کلاس‌های مختلف هر پارامتر نشان دهنده‌ی دامنه‌ی تغییرات آنها است که براساس تأثیر آنها بر آسیب‌پذیری آبخوان از ۱ تا ۱۰ ارزشیابی می‌شوند. این هفت پارامتر براساس اهمیت اثرشان از ۱ تا ۵ وزن‌دهی می‌شوند. مقادیر عددی وزن‌ها و ارزشیابی‌ها با استفاده از فن ارائه‌شده توسط مبدع این روش استخراج می‌شوند. نام این فن دلفی[1] است و از تجربیات تحقیق‌های گذشته و فعالیت‌های اجرایی حرفه‌ای در منطقه موردمطالعه جهت ارزیابی سطح ریسک استفاده می‌کند. معمولاً جهت ارزیابی و رتبه‌بندی معیارها ازنظر متخصصین استفاده می‌شود (جوادی[2] و همکاران، ۲۰۱۱).

مدل DRASTIC شاخص نهایی آسیب‌پذیری را از طریق تجمیع نتایج حاصل از ارزیابی معیارها و وزن‌های اختصاص داده‌شده به هر کدام از پارامترها محاسبه می‌کند. رابطه (۱) معادله تجمیع این شاخص‌ها را به همراه وزن‌ها و رتبه‌ها ارائه می‌دهد:

$$DVI = DrDw + \mathrm{R}rRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad (۱)$$

حروف D، R، A، S، T، I و C نشان‌دهنده‌ی پارامترهای مدل هستند و حروف r وw به‌ترتیب رتبه‌ها و وزن‌های اختصاص داده‌شده به هر پارامتر می‌باشد. نقشه‌ی تمام پارامترها در محیط GIS تهیه شده و طبقه‌بندی آسیب‌پذیری منطقه با استفاده از فن‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام می‌شود. هفت لایه‌ی اطلاعاتی رقومی شده و تبدیل به داده‌های رستی می‌شود. سپس شاخص آسیب‌پذیری با استفاده از نقشه‌ی آسیب‌پذیری منطقه با درنظرگرفتن مشاهده‌های میدانی هیدروژئولوژیک استخراج می‌گردد. فاکتورهای وزن‌دهی به خصوصیت‌های محلی در جدول ۱ ارائه شده است.

1 Delphi
2 Javadi

**جدول ۱: فاکتورهای مربوط به پارامتر مدل DRASTIC**

| پارامترها | پارامترهای فرعی | DRASTIC | | | DRASTIC-AHP | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | وزن | رتبه‌بندی | وزن کل | وزن AHP | رتبه‌بندی AHP | وزن AHP |
| عمق آب زیرزمینی (متر) D | صفر تا ۱۰ | ۵ | ۱۰ | ۵۰ | ۰/۲۸۹ | ۰/۴۶۰ | ۰/۱۳۳ |
| | ۱۰ تا ۲۰ | | ۷ | ۳۵ | | ۰/۲۹۲ | ۰/۰۸۴ |
| | ۲۰ تا ۳۰ | | ۵ | ۲۵ | | ۰/۱۳۴ | ۰/۰۳۹ |
| | ۳۰ تا ۴۰ | | ۳ | ۱۵ | | ۰/۰۶۷ | ۰/۰۱۹ |
| | از ۴۰ | | ۱ | ۵ | | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۱۴ |
| تغذیه خالص (میلی‌متر بر سال) R | ۵۰ تا ۱۰۰ | ۴ | ۱ | ۴ | ۰/۱۵۵ | ۰/۰۶۲ | ۰/۰۱۰ |
| | ۱۰۰ تا ۲۰۰ | | ۳ | ۱۲ | | ۰/۰۹۷ | ۰/۰۱۵ |
| | ۲۰۰ تا ۳۰۰ | | ۵ | ۲۰ | | ۰/۱۶۰ | ۰/۰۲۵ |
| | ۳۰۰ تا ۴۰۰ | | ۷ | ۲۸ | | ۰/۲۶۳ | ۰/۰۴۱ |
| | از ۴۰۰ | | ۹ | ۳۶ | | ۰/۴۱۹ | ۰/۰۶۵ |
| جنس آبخوان A | آبرفتی | ۳ | ۱۰ | ۳۰ | ۰/۰۹۶ | ۰/۳۵۸ | ۰/۰۳۴ |
| | کارستی | | ۹ | ۲۷ | | ۰/۲۴۹ | ۰/۰۲۴ |
| | آذر آواری | | ۷ | ۲۱ | | ۰/۱۷۲ | ۰/۰۱۷ |
| | رسوبات نئوژن | | ۶ | ۱۸ | | ۰/۰۹۹ | ۰/۰۱۰ |
| | افیولیت | | ۳ | ۹ | | ۰/۰۶۱ | ۰/۰۰۶ |
| | فلیش | | ۲ | ۶ | | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۰۴ |
| | متامورفیک | | ۱ | ۳ | | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۰۲ |
| جنس خاک S | - | ۲ | ۹ | ۱۸ | ۰/۰۶۱ | ۰/۴۱۹ | ۰/۰۲۶ |
| | گراول | | ۸ | ۱۶ | | ۰/۲۶۳ | ۰/۰۱۶ |
| | گراول – شن | | ۶ | ۱۲ | | ۰/۱۶۰ | ۰/۰۱۰ |
| | شن – رس | | ۲ | ۴ | | ۰/۰۹۷ | ۰/۰۰۶ |
| | رس | | ۱ | ۲ | | ۰/۰۶۲ | ۰/۰۰۴ |
| توپوگرافی (شیب) T | صفر تا ۲ | ۱ | ۱۰ | ۱۰ | ۰/۰۵۳ | ۰/۴۷۰ | ۰/۰۲۵ |
| | ۲ تا ۶ | | ۹ | ۹ | | ۰/۲۶۲ | ۰/۰۱۵ |
| | ۶ تا ۱۲ | | ۵ | ۵ | | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۰۸ |
| | ۱۲ تا ۲۰ | | ۳ | ۳ | | ۰/۰۷۹ | ۰/۰۰۴ |
| | از ۲۰ | | ۱ | ۱ | | ۰/۰۴۵ | ۰/۰۰۲ |
| اثر ناحیه غیر اشباع I | متامورفیک | ۵ | ۱ | ۵ | ۰/۲۳۵ | ۰/۰۳۰ | ۰/۰۰۷ |
| | افیولیتی | | ۱ | ۵ | | ۰/۰۴۲ | ۰/۰۱۰ |
| | رس | | ۲ | ۱۰ | | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۱۳ |
| | آتشفشانی | | ۵ | ۲۵ | | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۱۸ |
| | رس-ماسه سنگ | | ۶ | ۳۰ | | ۰/۱۱۲ | ۰/۰۲۶ |
| | کنگلومرا-ماسه سنگ | | ۸ | ۴۰ | | ۰/۱۵۷ | ۰/۰۳۷ |
| | سنگ آهک | | ۹ | ۴۵ | | ۰/۲۲۱ | ۰/۰۵۲ |
| | شن-گراول | | ۱۰ | ۵۰ | | ۰/۳۰۵ | ۰/۰۷۲ |
| هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) C | تا ۰/۰۰۸۶۴ | ۳ | ۲ | ۶ | ۰/۱۱۱ | ۰/۰۶۲ | ۰/۰۰۷ |
| | ۰/۰۰۸۶۴- ۰/۰۸۶۴ | | ۴ | ۱۲ | | ۰/۰۹۷ | ۰/۰۱۱ |
| | ۰/۰۸۶۴ – ۰/۸۶۴ | | ۶ | ۱۸ | | ۰/۱۶۰ | ۰/۰۱۸ |
| | ۰/۸۶۴ – ۸/۶۴ | | ۸ | ۲۴ | | ۰/۲۶۳ | ۰/۰۲۹ |
| | ۸/۶۴ – ۸۶/۴ | | ۱۰ | ۳۰ | | ۰/۴۱۹ | ۰/۰۴۷ |

در مرحله بعد از روش تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین وزن‌ها و رتبه‌های هر پارامتر در روش اصلاح‌شده DRASTIC استفاده می‌شود. این فرآیند برای محاسبه‌ی رتبه‌ها و وزن‌ها برای تمام پارامترها استفاده می‌شود تا از این طریق وزن‌های اولیه را که در معادله آسیب‌پذیری وجود دارد تغییر دهد. مقادیر شاخص آسیب‌پذیری جدید با استفاده از رتبه‌ها و وزن‌های جدید برای هر کدام از پارامترها محاسبه شده و نقشه‌ی اصلاح‌شده آسیب‌پذیری با استفاده از روش اصلاح‌شده DRASTIC-AHP در محیط GIS تولید می‌شود (اختری، ۱۳۸۵).

روش تحلیل سلسله مراتبی ابزار قدرتمندی برای حل مسائل پیچیده است که فاکتورهای همبسته متعددی را در نظر می‌گیرد. وزن‌های معیارهای خاص بااستفاده از رتبه‌بندی اهمیت آنها ایجاد می‌شود. زمانی که درخت مربوط به سلسله مراتب تهیه شده، ماتریس مقایسه جفتی برای هر پارامتر در هر سطحی ایجاد می‌شود. ازلحاظ ساختاری، این درخت به یک سری از ماتریس‌های مقایسه جفتی تقسیم و شکسته می‌شود و ارتباط بین پارامترها در نیمی از این ماتریس‌ها ارزیابی می‌شوند. مقایسه جفتی این امکان را فراهم می‌آورد تا تصمیم‌گیرندگان اهمیت هر کدام از فاکتورها را نسبت به هدف موردنظر به‌صورت مستقل ارزیابی کرده و فرآیند تصمیم‌گیری را ساده‌تر می‌کند (حبیبی، ۱۳۹۳).

مقایسه‌های جفتی از معیارهای متعدد در یک ماتریس مربعی جایگزین می‌شود. عناصر قطری این ماتریس همه عدد ۱ هستند. مقادیر ویژه اساسی و بردار ویژه سمت راست نرمال‌شده مربوط به ماتریس مقایسه‌های جفتی، اهمیت نسبی معیارهای را با یکدیگر مقایسه می‌کند. عناصر بردار ویژه نرمال‌شده باتوجه به معیارها و زیرمعیارها وزن‌دهی شده و باتوجه به گزینه‌های جایگزین رتبه‌بندی می‌شوند. سازگاری ماتریس مرتبه n ارزیابی می‌شود. اگر این شاخص سازگاری نتواند به مقدار حدی نزدیک شود، سپس پاسخ‌های ارائه‌شده به مقایسه‌ها دوباره آزمون می‌شوند. شاخص سازگاری CI با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌گردد:

$$CI = \frac{\lambda max - n}{n - ۱} \qquad (۲)$$

معیار CI شاخص سازگاری، $\lambda_{max}$ بزرگ‌ترین عدد بین مقادیر ویژه اساسی ماتریس است و n مرتبه‌ی ماتریس موردنظر است. شاخص CI می‌تواند با یک ماتریس تصادفی مقایسه شود، RI بنابراین نسبت CI/RI ضریب سازگار CR است. به‌عنوان یک قانون کلی۰,۱ ≤CR است که باید برای سازگاری ماتریس حفظ شود. برای این تحقیق،۰,۰۳۲۴ =CR، بنابراین مشخص می‌شود که ماتریس ایجادشده سازگار است. در مرحله نهایی رتبه‌های هر کدام از مقادیر جایگزین در وزن هر زیرمعیار ضرب شده و جمع می‌شوند تا مقادیر رتبه‌های محلی باتوجه به هر معیار تعیین شوند. سپس رتبه‌های محلی در وزن هر معیار ضرب شده و با یکدیگر جمع می‌شوند تا رتبه‌های کلی تعیین گردند.

درنهایت نقشه‌های آسیب‌پذیری تهیه‌شده با استفاده از داده‌های هیدروژئولوژیک و مقادیر نیترات ارزیابی می‌شود. همان‌طورکه در ناصری و صارمی‌نژاد (۱۳۹۰) بیان شده است، تحلیل رگرسیون خطی برای تعیین ارتباط آماری بین غلظت نیترات آب زیرزمینی و نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان که با استفاده از روش DRASTIC و روش اصلاح شده DRASTIC-AHP به‌دست‌آمده‌اند استفاده شده است. اما مقادیر حداقل و حداکثر شاخص آسیب‌پذیری از نقشه‌های آسیب‌پذیری مشابه نخواهند بود، درنتیجه نرمال‌سازی اطلاعات موجود برای نقشه‌ها تهیه شده‌اند. هدف از نرمال-

سازی داده‌ها، تجزیه ارتباط‌های بین آنومالی‌ها به‌منظور ایجاد ارتباط‌های ریز مقیاس‌تر و بهتر است. با استفاده از معادله (۳) داده‌های نقشه‌ی شاخص آسیب‌پذیری به صفر تا ۱۰۰ تبدیل می‌شود.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (۳)$$

که $X_{norm}$داده‌های نرمال‌شده، $X_{\min}$ مقادیر حداقل شاخص‌ها و $X_{\max}$ مقادیر حداکثر شاخص‌ها است.

هدف از تحلیل همبستگی ارزیابی و تفسیر قدرت، رابطه‌ی خطی یا غیرخطی بین دو متغیر پیوسته است. ضرایب همبستگی پیرسون مقادیر بین ۱- و ۱+ را شامل می‌شود. مقدار ۱- مربوط به همبستگی، منفی تا ۱+ همبستگی مثبت است. نشانه‌ی ضریب همبستگی جهت ارتباط متغیرها را نشان می‌دهد.

تحلیل رگرسیون خطی اثر نسبی مقادیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده را برای یک نتیجه خاص ارزیابی می‌کند. این مسأله با تحلیل همبستگی متفاوت است، چون هدف آن آزمون قدرت و جهت ارتباط بین دو متغیر تصادفی است. مدل رگرسیون خطی تنها شامل یک متغیر مستقل $X_i$ است. پارامترهای رگرسیون و متغیر مستقل هر دو خطی هستند.

$$Yi = a + bXi + ei \quad (۴)$$

که پارامتر رگرسیون a عرض از مبدأ و b ضریب رگرسیون یا شیب خط رگرسیون است. فرض شده است که عبارت خطای تصادفی ei همبستگی ندارد و میانگین آن صفر و واریانس ثابت است.

پارامترهای هفتگانه هیدروژئولوژیک که شامل عمق آب، تغذیه خالص، جنس آبخوان، جنس خاک، توپوگرافی، اثر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی است، باید در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان در نظر گرفته شوند. اطلاعات موردنیاز از شرکت مدیریت منابع آب ایران، تحقیقات میدانی و استفاده از مطالعات و گزارش‌های فنی موجود به‌دست آمده‌اند. به‌منظور تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از روش DRASTIC نقشه‌های مربوطه با استفاده از اطلاعات پایه به‌دست-آمده در محیط GIS تهیه شده است.

جهت تهیه نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی از ۱۳۰ چاه پیزومتری استفاده شد. براساس اطلاعات به‌دست‌آمده، عمق آب زیرزمینی از ۳ تا ۱۴۱ متر در محدوده موردمطالعه متغیر است. طبق جدول ۱ نقشه عمق آب زیرزمینی به پنج گروه تقسیم می‌شود. وزن عمق آب زیرزمینی معادل ۵ درنظر گرفته شد. مقادیر رتبه‌بندی کلاس‌های عمق آب زیرزمینی بین ۱-۱۰ می‌باشد.

همچنین به‌منظور تحلیل نقشه‌های طبقه‌بندی آب زیرزمینی از شاخص SAR و EC استفاده شد. جهت محاسبه تغذیه خالص از روش بیلان آب ماهانه در GIS استفاده شده است تا تخمین این پارامتر به بهترین شکل صورت گیرد. معادله بیلان برای این منطقه با استفاده از داده‌های هیدرولوژیک (بارندگی، تبخیر و تعرق، رواناب خروجی، رواناب ورودی، آب زیرزمینی خروجی و آب زیرزمینی خروجی از آکیفر) حل شده و به‌صورت سالانه تجمیع گردید. پس از کسر این مقادیر از حجم کل آب موجود در آبخوان، مقدار تغذیه خالص در هر سال محاسبه شد و میانگین آن در

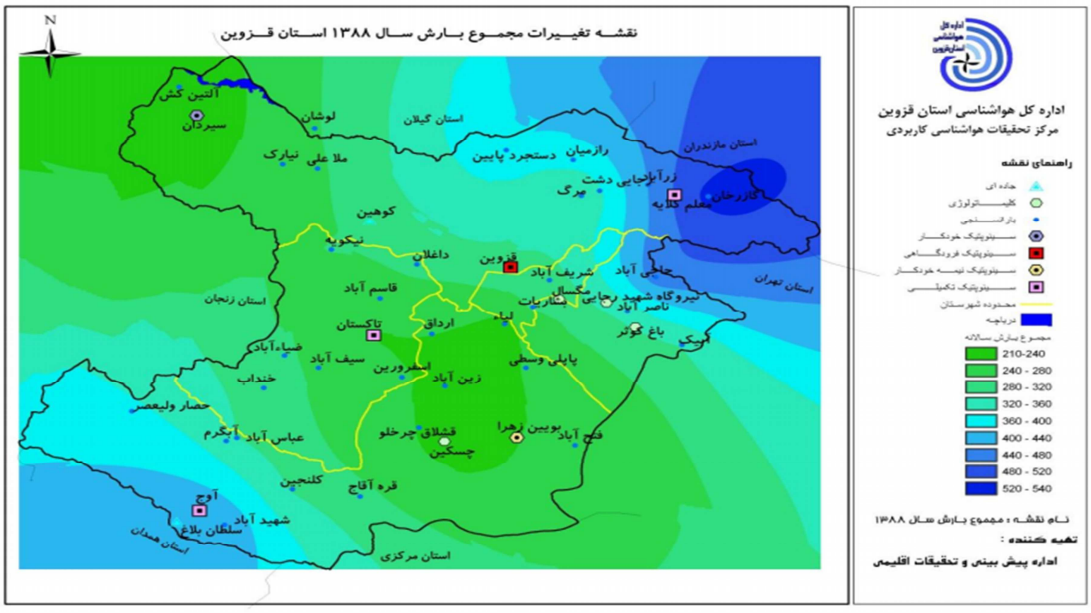
منطقه به‌عنوان شاخص آسیب‌پذیری در این بخش موردتوجه قرار گرفت. مقادیر رتبه‌بندی تغذیه خالص در جدول ۱ ارائه شده است.

## نتایج و بحث

### ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از روش DRASTIC

عمق آب زیرزمینی در تعیین عمق مواد آلاینده جهت رسیدن به مرز سطح آبخوان مؤثر است؛ بنابراین اهمیت خاصی در آسیب‌پذیری آبخوان دارد. این پارامتر بر روی زمان دسترسی به آلاینده‌ها جهت ایجاد واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیک نیز مؤثر است. هرچه عمق آب زیرزمینی بیشتر باشد، آنگاه زمان رسیدن آلاینده‌ها به آبخوان بیشتر یا به‌عبارت‌دیگر احتمال آلوده‌شدن آکیفر کمتر خواهد بود. مقادیر وزن و رتبه‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است.

تغذیه خالص آب زیرزمینی نشان‌دهنده‌ی میزان کل مقدار آب تغذیه‌شده از طریق بارندگی و نفوذ به آبخوان است. هرچه تغذیه خالص بیشتر باشد، آسیب‌پذیری آبخوان کمتر است. اطلاعات بارندگی سالانه جهت تهیه‌ی نقشه هم باران در منطقه براساس گزارش دفتر مطالعات شرکت آب منطقه‌ای قزوین (۱۳۸۸-۱۳۸۹) گردآوری شد. بارندگی در این منطقه در دوره آماری موجود از ۱۶۰ تا ۳۶۰ میلی‌متر در سال متغیر است. نقشه مربوط در شکل ۱ مقاله مشاهده است.




**شکل ۱: نقشه آبخوان استان قزوین**

نقشه آبخوان دشت قزوین با توجه به خصوصیت‌های هیدروژئولوژیک واحدهای سنگ‌شناسی تهیه شده است. هفت واحد هیدروژئولوژیک در این تحقیق درنظر گرفته شده است. رسوب‌های ته‌نشین‌شده و آبرفت‌ها در واحدهای آبرفتی طبقه‌بندی شده‌اند که بیشترین آسیب‌پذیری را تحمیل می‌کند. واحدهای دولومیت و سنگ آهک کارستی را تشکیل

می‌دهند که نفوذپذیری بسیار بالایی دارند. واحدهای آذرآوری و رسوب‌های نئوژن به‌عنوان واحدهای نیمه نفوذپذیر به‌ترتیب با رتبه ۷ و ۶ مشخص شده‌اند. ترکیب‌های افیولیت، فلیش و سنگ‌های دگردیس‌شده به‌عنوان واحدهای غیرقابل‌نفوذ درنظر گرفته شده‌اند، چون نفوذپذیری بسیار کم است. بر اساس استانداردهای روش DRASTIC، رتبه-بندی‌های جنس آبخوان از ۱ برای واحدهای دگردیس‌شده تا ۱۰ برای آکیفرهای آبرفتی متغیر است (جدول ۱).

جنس خاک یا نوع پوشش خاک، اثر قابل‌توجهی در تغذیه آبخوان دارد و حرکت آلاینده‌ها را در ناحیه غیراشباع کنترل می‌کند. این پارامتر می‌تواند اهمّیت خاصی در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان داشته باشد. خاک‌های رسی می-توانند باعث کاهش نفوذپذیری نسبی خاک و ایجاد محدودیت در انتقال آلاینده‌ها شوند؛ درنتیجه کلاس خاک رس کمترین میزان رتبه را در آسیب‌پذیری آبخوان به‌خود اختصاص می‌دهد. رتبه‌بندی و مقادیر وزن‌ها این پارامتر در جدول ۱ ارائه شده است.

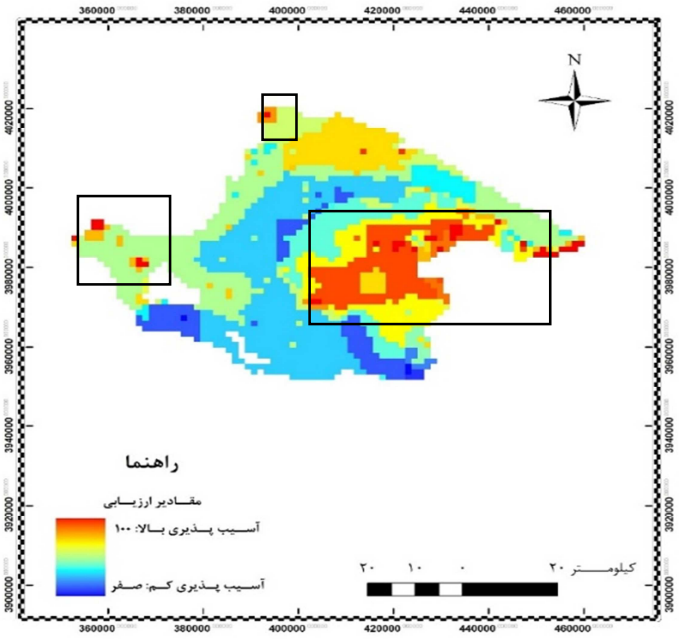
توپوگرافی به‌صورت شیب‌دار درنظر گرفته شده است. ازآنجایی‌که درصد شیب میزان رواناب حاوی آلاینده قبل از نفوذ به خاک را مشخص می‌کند، اثر نسبتاً قابل‌ملاحظه‌ای دارد. مدل ارتفاعی دیجیتال[1] منطقه موردمطالعه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰تهیه شده است. پنج کلاس شیب جهت بکارگیری روش DRASTIC تعیین شده‌اند. برای شیب‌های بالاتر از ۲۰ درجه رتبه ۱۰ و برای شیب‌های بین صفر تا ۲ درجه رتبه‌ی ۱ در نظر گرفته شده است. این مطلب در جدول یک قابل مشاهده است.

ناحیه غیر اشباع نقش مهمی در نفوذ باران و جریان سطحی دارد. کلاس‌های اصلی ناحیه غیر اشباع شامل متامورفیک، افیولیتی، رس، آتشفشانی، رس-ماسه‌سنگ، کنگلومرا-ماسه‌سنگ، سنگ آهک، شن-گراول می‌باشد. این واحدها با روش DRASTIC ارزیابی شده‌اند؛ بیشترین وزن به کلاس شن-گراول اختصاص یافته است. رتبه‌بندی و مقادیر وزن‌های این پارامتر در جدول ۱ ارائه شده است.

براساس تعداد ۳۲ آزمون مربوط به پمپاژ چاه‌ها در منطقه دشت قزوین، داده‌های هدایت هیدرولیکی جمع‌آوری شده است. هدایت هیدرولیکی در نیمه غربی منطقه تغییرات مکانی شدیدتری دارد؛ مقادیر هدایت هیدرولیکی در این ناحیه از ۰/۲ تا ۱۲ متر در روز متغیر است. اما تغییرات هدایت هیدرولیکی در نیمه شرقی منطقه تغییرات کمتری داشته و حداکثر مقدار هدایت هیدرولیکی ۳ متر در روز است. هدایت هیدرولیکی نیز در پنج کلاس طبقه‌بندی شد. جزئیات رتبه و وزن این پارامتر در جدول ۱ ارائه شده است.

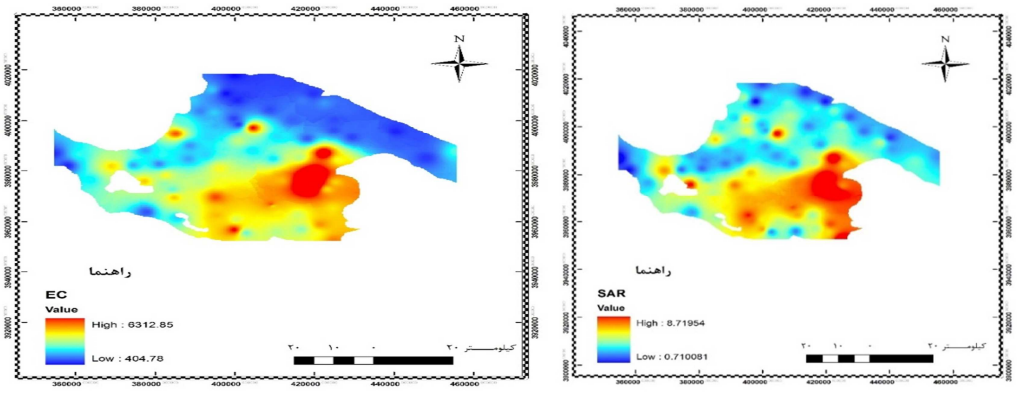
شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC براساس رابطه (۱) محاسبه شده است و بین ۱۰۰ و ۱۵۳ متغیر است. نقشه شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC منطقه با استفاده از ترکیب نقشه‌های هیدروژئولوژیک هفتگانه با استفاده از ابزار ماشین حساب رستری در محیط GIS به‌دست آمده است (شکل ۲). باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی آسیب-پذیری آب زیرزمینی، منطقه مرکزی در نیمه شرقی منطقه موردمطالعه بالاترین میزان آسیب‌پذیری را دارد. نقاط محدودی نیز بالاترین میزان آسیب‌پذیری را دارا است که با رنگ قرمز و همچنین با مستطیل مشخص شده است.

[1] DEM




**شکل ۲: آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین با استفاده از روش DRASTIC**

تحلیل نقشه‌های طبقه‌بندی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص SAR و EC (شکل ۳) در مقایسه با نقشه آسیب-پذیری آبخوان جهت ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بخشی از مناطق که در تصویر با مستطیل مشخص شده‌اند، به وضوح هم از لحاظ آسیب‌پذیری مقادیر بالایی دارد و هم از لحاظ آلودگی پتانسیل تولید بیشتری دارد که در هر دو نقشه با رنگ قرمز و توسط مستطیل مشخص شده است. بنابراین باید توجه ویژه‌ای به این مناطق داشت و جهت جلوگیری از تولید مواد آلاینده در این مناطق تمهیداتی اندیشید. از سوی دیگر منطقه شمالی آبخوان نیز در معرض خطر آلودگی و آسیب‌پذیری بیشتری به نسبت مناطق جنوبی و شمال شرقی آبخوان قرار دارند. در کل می-توان گفت تیپ کلی نقشه‌های آلودگی با میزان آسیب‌پذیری مشابه یکدیگر است. به‌عبارت‌دیگر در مکان‌هایی که آلودگی بیشتری وجود دارد آسیب‌پذیری این مناطق نیز بیشتر است و بلعکس. اما مکان‌هایی (اگرچه نسبتاً درصد کمی را به خود اختصاص می‌دهند) نیز وجود دارد که علی‌رغم آسیب‌پذیری بالای آبخوان، مواد آلاینده کمتری تجمع دارد. بنابراین در این مناطق، مانند شمال غربی آبخوان، خطر آسیب‌پذیری کمتر است.

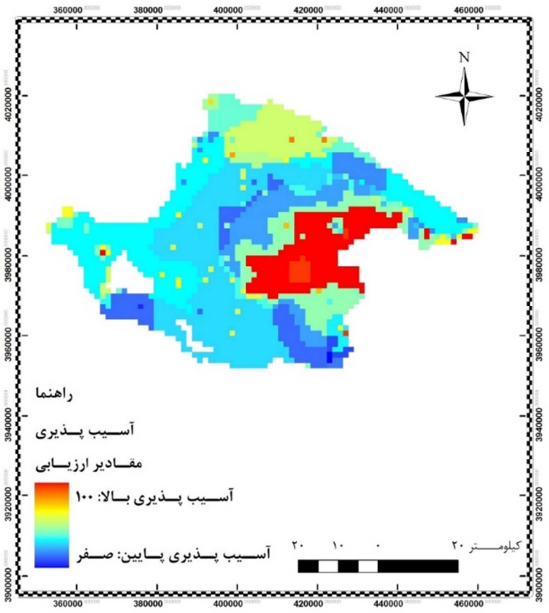



**شکل ۳: نقشه طبقه‌بندی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص SAR و EC آبخوان قزوین (واحد EC میکروزیمنس در ثانیه است.)**

به‌منظور کاربرد روشی واقعی‌تر جهت طبقه‌بندی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، دامنه‌های پارامترهای روش DRASTIC با استفاده از فن تحلیل سلسله مراتبی اصلاح شدند. مقایسه جفتی ماتریس‌ها برای هفت پارامتر یادشده محاسبه شد و در فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری مورداستفاده قرار گرفت و ضرایب رتبه‌بندی جدید برای هر پارامتر محاسبه شد. سپس هر پارامتر با خودش ارزیابی شد و مقادیر رتبه‌بندی ثانویه به‌دست آمد. ضرایب رتبه‌بندی در تهیه‌ی نقشه‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان محاسبه شد و در مقادیر رتبه‌بندی جدید هر پارامتر ضرب گردید (جدول ۱). نقشه‌های حاصل از روش DRASTIC-AHP با استفاده از تحلیل همپوشانی نقشه‌های پایه به‌دست‌آمده از پارامترهای آسیب-پذیری تهیه شد (شکل ۴).

### ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از روش DRASTIC-AHP

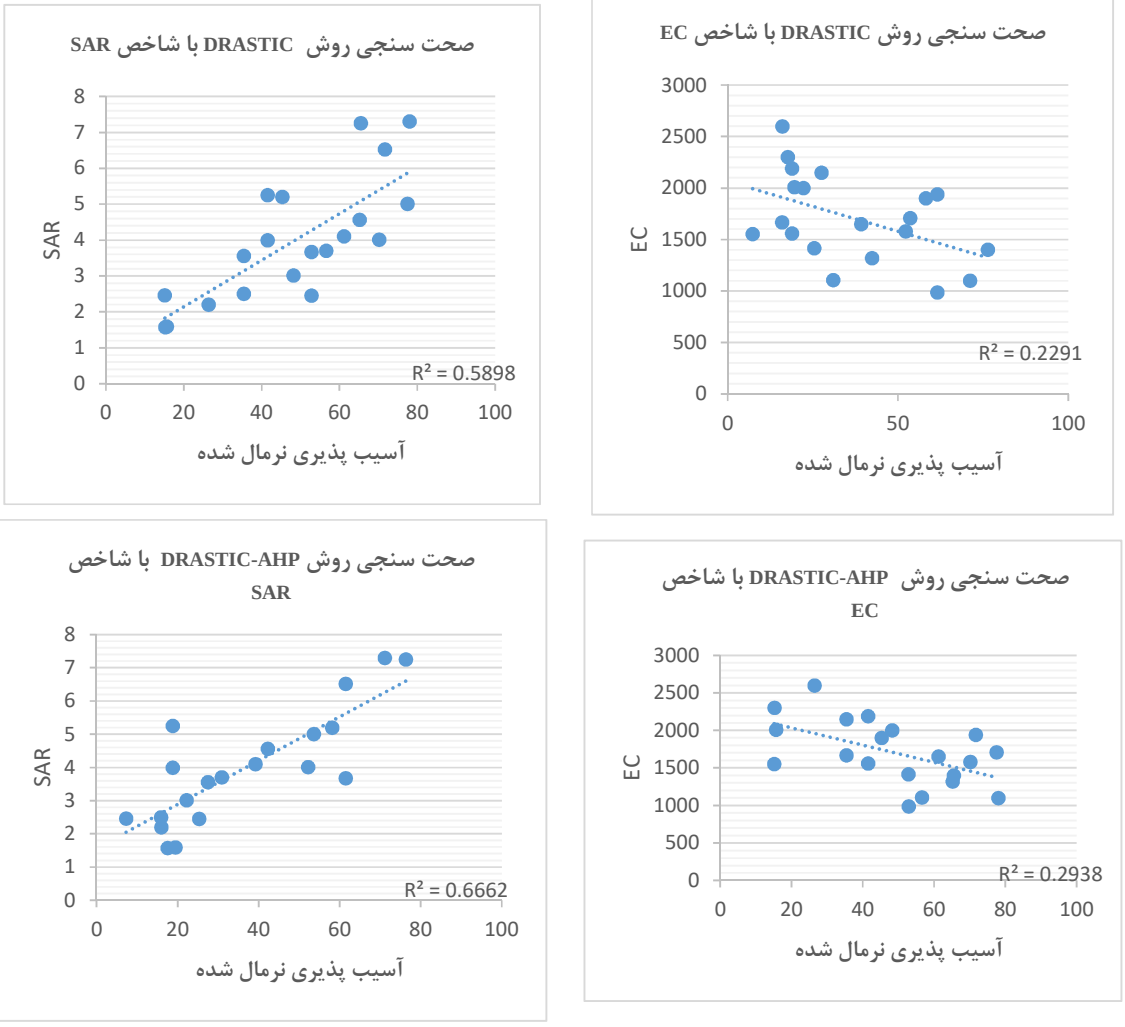
همان‌طور که مشخص است تیپ کلی نقشه ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از روش DRASTIC-AHP مشابه روش سنتی آن است؛ اما مقادیر به‌دست‌آمده باتوجه به ضرایب حاصل از روش سلسله مراتبی نواحی نسبتاً آسیب‌پذیر در روش سنتی به روش‌های با آسیب‌پذیری کمتر تبدیل شده است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که منطقه‌ی شرقی (منطقه میانی قرمز رنگ) همانند روش سنتی در روش اصلاح‌شده نیز با فن سلسله مراتبی، آبخوان وضعیت مشابهی دارد. اما مقادیر آسیب‌پذیری در روش اصلاح‌شده در این ناحیه بالاتر به‌دست‌آمده به این معنا که خطر آسیب‌پذیری در این ناحیه بیشتر از روش سابق است. اما در سایر مناطق اکثراً در روش اصلاح‌شده وضعیت بهتری برآورد شده است. با مقایسه نقشه‌های کیفیت آب (SAR و EC) با نقشه ارزیابی آبخوان مشخص می‌شود که در نواحی که تمرکز مواد آلاینده کمتر است، ارزیابی آسیب‌پذیری به نسبت به واقعیت نزدیک‌تر برآورد شده است.




**شکل ۴: آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین با استفاده از روش DRASTIC-AHP**

### صحت‌سنجی نقشه‌های آسیب‌پذیری

در روش DRASTIC فرض بر این است که آلاینده‌ها سیال‌هایی مشابه آب هستند. فعالیت‌های کشاورزی و افزایش شوری در منطقه باعث بروز آلودگی آب زیرزمینی شده است. در نتیجه، صحت‌سنجی نقشه‌های آسیب‌پذیری با مقادیر شاخص SAR و EC کنترل شده است و به همین منظور ۲۰ نمونه به‌صورت تصادفی از داده‌های این دو شاخص از کل ناحیه موردمطالعه با پراکندگی متناسب برداشت کرده و در مورد مقادیر ارزیابی‌شده تحلیل می‌کنیم. جهت تعیین ارتباط آماری بین شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی و نقشه‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، رگرسیون خطی مورداستفاده قرار گرفت. مقادیر سلول‌های معادل با نمونه‌های برداشت‌شده از شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی محاسبه شده و در مقابل آن‌های قرار می‌گیرد تا میزان صحت نقشه‌های به‌دست‌آمده مشخص شود. در این تحلیل شاخص‌های کیفی به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر آسیب‌پذیری نرمال‌شده به‌عنوان متغیر مستقل درنظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل رگرسیون، مشخص می‌شود که رابطه بین شاخص SAR به نسبت EC با مقادیر ارزیابی قوی‌تر است. در هر صورت، مقایسه ضرایب همبستگی مقادیر شاخص کیفی با آسیب‌پذیری جهت مقایسه صحت روش‌های DRASTIC و DRASTIC-AHP است. ضریب همبستگی شاخص کیفی SAR با مقادیر آسیب‌پذیری با روش DRASTIC و DRASTIC-AHP به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۶۶ به‌دست آمده‌اند و همچنین ضریب همبستگی شاخص کیفی EC با مقادیر آسیب‌پذیری با روش DRASTIC و DRASTIC-AHP به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۲۹ به‌دست آمده‌اند. همان‌طورکه مشخص است چه از لحاظ شاخص کیفی SAR چه از لحاظ EC مقادیر ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در روش DRASTIC-AHP برازش بیشتری دارد. بنابراین می‌توان گفت نتایج به‌دست‌آمده از روش DRASTIC-AHP نسبت به روش سنتی آن بهبود یافته است.




**شکل ۵: رگرسیون خطی بین شاخص کیفی SAR و EC با مقادیر آسیب‌پذیری در دو روش DRASTIC و DRASTIC-AHP**

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در آبخوان قزوین استفاده شد. اگر خصوصیت‌های هیدروژئولوژیک مانند نوع آبخوان، ضخامت آبخوان، سطح آب زیرزمینی و جهت جریان آب زیرزمینی و غیره به خوبی شناخته شوند، نتایج دقیق‌تری به‌دست می‌آید. به‌منظور بهبود نتایج این روش محققان اصلاحاتی در این روش ایجاد کرده‌اند. این اصلاحات شامل اضافه یا کم‌کردن پارامترهای اصلی روش، حذف برخی از اطلاعات غیرمفید و تغییر نحوه رتبه‌بندی و وزن‌دهی پارامترها بوده است. در این تحقیق روش DRASTIC با استفاده از فن تحلیل سلسله مراتبی اصلاح شد تا رتبه‌ها و وزن‌های اختصاص داده‌شده به پارامترها از دقت بیشتری برخوردار باشد. کلاس‌های آسیب‌پذیری منطقه موردمطالعه به‌صورت شفاف با استفاده از روش DRASTIC-AHP تخمین زده شد.

ارزیابی‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در این منطقه واقعی و مناسب تشخیص داده شد. اما علی‌رغم موفقیت در ارزیابی در برخی از مطالعات، روش DRASTIC معایبی نیز دارد. اثر خصوصیت‌های منطقه‌ای مانند زمین‌شناسی، هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و غیره با همان ضرایب روش ابداع‌شده قابل کاربرد در مناطق دیگر نیست. نتایج حاصله نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده از روش DRASTIC با شاخص‌های کیفی موردنظر تطابق نسبی دارد. همچنین نتایج مشابهی در مورد روش DRASTIC-AHP به‌دست آمد. به‌دلیل اینکه اغلب فعالیت‌های مؤثر بر آلودگی آب زیرزمینی در دشت قزوین به فعالیت‌های کشاورزی محدود می‌شود، از دو شاخص SAR و EC جهت ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از نقشه‌های آسیب‌پذیری استفاده شد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی نشان داد که در شرق منطقه آسیب‌پذیری و پتانسیل آلودگی هر دو سطح بالایی داشته و خطر آلودگی آب زیرزمینی در این مناطق از سایر نقاط بیشتر است. بنابراین مدیران آب و محیط‌زیست در این منطقه بایستی توجه ویژه‌ای به تولید مواد آلاینده در این ناحیه داشته باشند و طرح‌های مدیریتی خاصی جهت کنترل آلودگی آب‌های زیرزمینی اتخاذ نمایند. جهت صحت‌سنجی دقیق‌تر نتایج به‌دست‌آمده از این دو روش و مقایسه آن‌ها از رگرسیون خطی استفاده شد. برای این منظور چند نقطه به‌صورت نمونه از آبخوان برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. مقادیر شاخص‌های کیفی و آسیب‌پذیری از هر دو روش در این نقاط استخراج گردید. با برقراری ارتباط میان هر کدام از شاخص‌ها با یکی از روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، به تفکیک میزان دقت روش‌ها بررسی شد. مشخص گردید که روش DRASTIC-AHP از دقت بالاتری نسبت به روش سنتی آن برخوردار است و تطابق بیشتری با شاخص‌های کیفی واقع‌شده در منطقه دارد.

## منابع


اختری، یوسف. (۱۳۸۶). ارزیابی مدل بالقوه آلودگی آبخوان زویرچری و خران با استفاده از مدل دراستیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاکی، رضوان؛ خیاط خلقی، مجید؛ روشنی، احسان. (۱۳۸۸). آنالیز حساسیت روش شاخص-همپوشانی DRASTIC در فرآیند آسیب-پذیری سفره آب زیرزمینی (بررسی موردی: دشت قزوین). مجله مرتع و آبخیزی (منابع طبیعی ایران)، ۶۲ (۳): ۳۵۳-۳۶۲.

جوادی، سامان؛ کاوه‌کار، ندا؛ موسوی زاده، محمدحسن؛ محمدی، کوروش. (۱۳۸۹). اصلاح مدل DRASTIC با استفاده از اندازه‌گیری‌های نیترات در مناطق کشاورزی در طرح آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، فصلنامه بین‌المللی علوم و فناوری کشاورزی، دوره ۱۳، شماره۲؛ ۲۴۹- ۲۳۹. https://jast.modares.ac.ir/article-23-10411-en.html&sw=Drastic

حبیبی، آرش؛ ایزدیار، صدیقه؛ سرافرازی، اعظم. (۱۳۹۳). فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP. تصمیم‌گیری چندمنظوره فازی. آذرسیمای دانش.

دفترمطالعات آب منطقه‌ای استان قزوین.(۱۳۸۹). سالنامه هواشناسی قزوین سال ۱۳۸۸. سازمان هواشناسی کشور.

دفتر مطالعات آب منطقه‌ای استان قزوین.(۱۳۹۷). سالنامه هواشناسی قزوین در سال ۹۶-۹۷. سازمان هواشناسی کشور.

عزیزی مبصر، جوانشیر؛ مسعودلک، مهسا؛ رسول‌زاده، علی. (۱۳۹۷). ارزیابی آسیب‌پذیی آلودگی آب زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از مدل‌های دراستیک و دراستیک اصلاح‌شده. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۵): ۱۹۳-۲۰۴. http://iwrr.sinaweb.net/article_66469.html

ناصری، حمیدرضا؛ صارمی‌نژاد، فردوس. (۱۳۹۰). مقایسه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به روش‌های DRASTIC و منطق فازی، مطالعه موردی: دشت گل‌گیر مسجد سلیمان. جغرافیای طبیعی لارستان، ۴ (۱۱): ۱۷-۳۴.

Al-Adamat, R. A., Foster, I. D., & Baban, S. M. (2003). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. Applied Geography, 23(4), 303-324. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2003.08.007 .
Aller, L. (1985). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
Awawdeh, M. M., & Jaradat, R. A. (2010). Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method. Arabian Journal of Geosciences, 3(3), 273-282. https://doi.org/10.1007/s12517-009-0074-9 .
Bhushan, N., & Rai, K. (2007). Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process. Springer Science & Business Media.
Bhushan, N., & Rai, K. (2007). Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process. Springer Science & Business Media.
Chuang, P. T. (2001). Combining the analytic hierarchy process and quality function deployment for a location decision from a requirement perspective. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18(11), 842-849. https://doi.org/10.1007/s001700170010 .
Doerfliger, N., Jeannin, P. Y., & Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology, 39(2), 165-176. https://doi.org/10.1007/s002540050446 .
Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental geology, 39(6), 549-559. https://doi.org/10.1007/s002540050466 .
Guo, Q., Wang, Y., Gao, X., & Ma, T. (2007). A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. Environmental Geology, 52(5), 923-932. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0534-4 .
Hamerlinck, J. D., & Arneson, C. S. (1998). Wyoming groundwater vulnerability assessment handbook volume 1. Background, model development and aquifer sensitivity analysis. Laramie, WY: University of Wyoming, Spatial Data and Visualization Center Report, 98-01.
Kalinski, R. J., Kelly, W. E., Bogardi, I., Ehrman, R. L., & Yaniamoto, P. D. (1994). Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. Groundwater, 32(1), 31-34. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00607.x .
Lake, I. R., Lovett, A. A., Hiscock, K. M., Betson, M., Foley, A., Sünnenberg, G., ... & Fletcher, S. (2003). Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS. Journal of Environmental Management, 68(3), 315-328. https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00095-1 .
Lasserre, F., Razack, M., & Banton, O. (1999). A GIS-linked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater. Journal of hydrology, 224(3-4), 81-90. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00130-4 .
Lee, S. (2003). Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. Environmental Geology, 44(6), 654-664. https://doi.org/10.1007/s00254-003-0803-4 .
Martínez-Bastida, J. J., Arauzo, M., & Valladolid, M. (2010). Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. Hydrogeology Journal, 18(3), 681-698. https://doi.org/10.1007/s10040-009-0549-5 .
McLay, C. D. A., Dragten, R., Sparling, G., & Selvarajah, N. (2001). Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. Environmental Pollution, 115(2), 191-204. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00111-7 .
Meinardi, C. R., Beusen, A. H. W., Bollen, M. J. S., Klepper, O., & Willems, W. J. (1995). Vulnerability to diffuse pollution and average nitrate contamination of European soils and groundwater. Water Science and Technology, 31(8), 159-165. https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00368-W .
Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. Applied geography, 28(1), 32-53. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.008 .
Rupert, M. G. (1999). Improvements to the DRASTIC ground-water vulnerability mapping method (No. 066-99). US Geological Survey. https://doi.org/10.3133/fs06699 .
Secunda, S., Collin, M. L., & Melloul, A. J. (1998). Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. Journal of environmental management, 54(1), 39-57. https://doi.org/10.1006/jema.1998.0221 .
Sener, E., & Davraz, A. (2013). Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). Hydrogeology Journal, 21(3), 701-714. https://doi.org/10.1006/jema.1998.0221 .
Şener, Ş., Şener, E., Nas, B., & Karagüzel, R. (2010). Combining AHP with GIS for landfill site selection: a case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). Waste management, 30(11), 2037-2046. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.024 .

Simsek, C., Kincal, C., & Gunduz, O. (2006). A solid waste disposal site selection procedure based on groundwater vulnerability mapping. Environmental geology, 49(4), 620-633. https://doi.org/10.1007/s00254-005-0111-2 .
Thapinta, A., & Hudak, P. F. (2003). Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. Environment International, 29(1), 87-93. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00149-6 .
Tilahun, K., & Merkel, B. J. (2010). Assessment of groundwater vulnerability to pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. Environmental Earth Sciences, 59(7), 1485-1496. https://doi.org/10.1007/s12665-009-0134-1 .
Umar, R., Ahmed, I., & Alam, F. (2009). Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of Central Ganga Plain, Western Uttar Pradesh. Journal of the Geological Society of India, 73(2), 193-201. https://doi.org/10.1007/s12594-009-0075-z .
Varol, S. O., & Davraz, A. (2010). Hydrogeological investigation of Sarkikaraagac Basin (Isparta, Turkey) and groundwater vulnerability. Water international, 35(2), 177-194. https://doi.org/10.1080/02508061003663445 .
Wang, Y., Merkel, B. J., Li, Y., Ye, H., Fu, S., & Ihm, D. (2007). Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. Environmental Geology, 53(3), 479-484. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0669-y .
Zou, K. H., Tuncali, K., & Silverman, S. G. (2003). Correlation and simple linear regression. Radiology, 227(3), 617-628. https://doi.org/10.1148/radiol.2273011499 .

**Research Article**

# Vulnerability evaluation of Qazvin Plain Using DRASTIC-AHP Based on Geographic Information System

**Abdollah Taheri Tizro[1*], Milad Qaleban Tgmedash[2], Fateme Farajy[3]**

1*. Associate Professor, Department of water Engineering, Bu-Ali Sina University, Iran
2. PhD Student of Department of water Engineering, Bu-Ali Sina University, Iran.
3. PhD Student of Department of water Engineering, Bu-Ali Sina University, Iran.

Received: 20-04-2020 Final Revised: 02-11-2020 Accepted: 21-11-2020

## Abstract

Groundwater pollution due to human activities is one of the most serious environmental problems in industrial and agricultural areas. Groundwater is one of the main sources of drinking water in our country, so it is very important to study the vulnerability of these sources. In this research, the modified DRASTIC method based on GIS has been used to study the vulnerability of groundwater in Qazvin plain. Using hierarchical analysis method, the coefficients related to each parameter were determined by DRASTIC method. Linear regression analysis was used to evaluate the statistical relationship between the concentration of groundwater pollutants and its vulnerable areas.The resulting vulnerability map shows that the values obtained from the DRASTIC method are relatively consistent with the desired quality indicators and similar results were obtained for the DRASTIC-AHP method.Comparison of the obtained results with groundwater quality indicators showed that in the east of the region, vulnerability and pollution potential are both high and the risk of groundwater pollution in these areas is higher than elsewhere.By establishing a regression relationship between groundwater quality indicators and vulnerability assessment methods, the accuracy of the methods was investigated.It was found that the DRASTIC-AHP method has a higher accuracy than the traditional method and is more in line with the quality indicators located in the region.

**Keywords**: Groundwater, pollution, hydrogeology, Analytic hierarchy process.

* Corresponding Author Email: ttizro@Basu.ac.ir

## References

## References (in Persian)

Akhtari, Y. (2007). Evaluation of aquifer pollution potential model Zvyrchry and Kheran using DRASTIC (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, Department of Geology, Shahid Chamran University). [In Persian]

Habibi, A., Izadyar, S., Sarafrazi, A. (2015). Analytic hierarchy process AHP. Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Azar Simaye Danesh. [In Persian]

Javadi,S., Kavehkar, N., Mousavizadeh,M H., Mohammadi,K., (2011), Modification of DRASTIC Model to Map Groundwater Vulnerability to Pollution Using Nitrate Measurements in Agricultural Areas, J Agric Sci Tech, vol. 13, pp. 239-249. https://jast.modares.ac.ir/article-23-10411-en.html&sw=Drastic . [In Persian]

Azizi Mobaser, J., Masud Lak, M., Rasoulzadeh, A. (2019). Evaluation of Vulnerability of Urmia Plain Groundwater Pollution Using Original and Modified DRASTIC Models. Volume 14, No. 5. http://iwrr.sinaweb.net/article_66469.html . [In Persian]

Nasseri, H. R., Saremi nejad, F. (2011). A Comparison of Delineative of Vulnerability of Aquifer Using Drastic Model and Fuzzy. Logic Case Study: Golgir plain of Masjed Solieman. JOURNAL OF PHYSICAL GEOGRAPHY. Volume 4, Number 11; Page(s) 17 To 34. [In Persian]

Qazvin Regional Water Studies Office. (2011). Qazvin Meteorological Yearbook (2010). Meteorological Organization of the country. [In Persian]

Qazvin Regional Water Studies Office. (2019). Qazvin Meteorological Yearbook (2018-2019). Meteorological Organization of the country. [In Persian]

Taaki, R., Khyat, K. M., & Roushani, E. (2009). Sensitivity analysis for drastic overlay index method in groundwater vulnerability process (case study: Ghazvin plain). [In Persian]

### References (in English)

Al-Adamat, R. A., Foster, I. D., & Baban, S. M. (2003). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. Applied Geography, 23(4), 303-324. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2003.08.007 .

Aller, L. (1985). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Awawdeh, M. M., & Jaradat, R. A. (2010). Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method. Arabian Journal of Geosciences, 3(3), 273-282. https://doi.org/10.1007/s12517-009-0074-9 .

Bhushan, N., & Rai, K. (2007). Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process. Springer Science & Business Media.

Bhushan, N., & Rai, K. (2007). Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process. Springer Science & Business Media.

Chuang, P. T. (2001). Combining the analytic hierarchy process and quality function deployment for a location decision from a requirement perspective. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18(11), 842-849. https://doi.org/10.1007/s001700170010 .

Doerfliger, N., Jeannin, P. Y., & Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology, 39(2), 165-176. https://doi.org/10.1007/s002540050446 .

Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental geology, 39(6), 549-559. https://doi.org/10.1007/s002540050466 .

Guo, Q., Wang, Y., Gao, X., & Ma, T. (2007). A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. Environmental Geology, 52(5), 923-932. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0534-4 .

Hamerlinck, J. D., & Arneson, C. S. (1998). Wyoming groundwater vulnerability assessment handbook volume 1. Background, model development and aquifer sensitivity analysis. Laramie, WY: University of Wyoming, Spatial Data and Visualization Center Report, 98-01.

Kalinski, R. J., Kelly, W. E., Bogardi, I., Ehrman, R. L., & Yaniamoto, P. D. (1994). Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. Groundwater, 32(1), 31-34. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00607.x .

Lake, I. R., Lovett, A. A., Hiscock, K. M., Betson, M., Foley, A., Sünnenberg, G., ... & Fletcher, S. (2003). Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS. Journal of Environmental Management, 68(3), 315-328. https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00095-1 .

Lasserre, F., Razack, M., & Banton, O. (1999). A GIS-linked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater. Journal of hydrology, 224(3-4), 81-90. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00130-4 .

Lee, S. (2003). Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. Environmental Geology, 44(6), 654-664. https://doi.org/10.1007/s00254-003-0803-4 .

Martínez-Bastida, J. J., Arauzo, M., & Valladolid, M. (2010). Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. Hydrogeology Journal, 18(3), 681-698. https://doi.org/10.1007/s10040-009-0549-5 .

McLay, C. D. A., Dragten, R., Sparling, G., & Selvarajah, N. (2001). Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. Environmental Pollution, 115(2), 191-204. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00111-7 .
Meinardi, C. R., Beusen, A. H. W., Bollen, M. J. S., Klepper, O., & Willems, W. J. (1995). Vulnerability to diffuse pollution and average nitrate contamination of European soils and groundwater. Water Science and Technology, 31(8), 159-165. https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00368-W .
Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. Applied geography, 28(1), 32-53. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.008 .
Rupert, M. G. (1999). Improvements to the DRASTIC ground-water vulnerability mapping method (No. 066-99). US Geological Survey. https://doi.org/10.3133/fs06699 .
Secunda, S., Collin, M. L., & Melloul, A. J. (1998). Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. Journal of environmental management, 54(1), 39-57. https://doi.org/10.1006/jema.1998.0221 .
Sener, E., & Davraz, A. (2013). Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). Hydrogeology Journal, 21(3), 701-714. https://doi.org/10.1006/jema.1998.0221 .
Şener, Ş., Şener, E., Nas, B., & Karagüzel, R. (2010). Combining AHP with GIS for landfill site selection: a case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). Waste management, 30(11), 2037-2046. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.024 .
Simsek, C., Kincal, C., & Gunduz, O. (2006). A solid waste disposal site selection procedure based on groundwater vulnerability mapping. Environmental geology, 49(4), 620-633. https://doi.org/10.1007/s00254-005-0111-2 .
Thapinta, A., & Hudak, P. F. (2003). Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. Environment International, 29(1), 87-93. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00149-6 .
Tilahun, K., & Merkel, B. J. (2010). Assessment of groundwater vulnerability to pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. Environmental Earth Sciences, 59(7), 1485-1496. https://doi.org/10.1007/s12665-009-0134-1 .
Umar, R., Ahmed, I., & Alam, F. (2009). Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of Central Ganga Plain, Western Uttar Pradesh. Journal of the Geological Society of India, 73(2), 193-201. https://doi.org/10.1007/s12594-009-0075-z .
Varol, S. O., & Davraz, A. (2010). Hydrogeological investigation of Sarkikaraagac Basin (Isparta, Turkey) and groundwater vulnerability. Water international, 35(2), 177-194. https://doi.org/10.1080/02508061003663445 .
Wang, Y., Merkel, B. J., Li, Y., Ye, H., Fu, S., & Ihm, D. (2007). Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. Environmental Geology, 53(3), 479-484. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0669-y .
Zou, K. H., Tuncali, K., & Silverman, S. G. (2003). Correlation and simple linear regression. Radiology, 227(3), 617-628. https://doi.org/10.1148/radiol.2273011499