

پهنه‌بندی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی آبخوان دشت مرند به روش AVI و مدل‌های DRASTIC در محیط GIS

اصغر اصغری مقدم^۱
میرسجاد فخری^۲
مرتضی نجیب^۳

چکیده

این تحقیق با هدف پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان مرند با استفاده از روش‌های AVI، DRASTIC و مقایسه پهنه‌بندی در سه روش مذکور انجام شده است. روش DRASTIC از ترکیب هفت مشخصه هیدروژئولوژیک قابل اندازه‌گیری و مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی تشکیل شده است. روش AVI نیز دارای دو مشخصه است. نتایج حاصل از روش DRASTIC تقریباً کامل‌ترین شاخص برای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی است که محدوده آسیب‌پذیری متوسط را ۵۰/۴ درصد، زیاد را ۳۲/۹ و خیلی زیاد را ۱۶/۷ درصد برای آبخوان دشت مرند برآورد کرده است. نتایج روش AVI نیز نشان می‌دهد که آبخوان دارای آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با ۳۹/۱۳، ۶/۵ و ۵۴/۳۷ درصد می‌باشد. همچنین در هر دو روش، میزان آسیب‌پذیری در قسمت‌های شرقی، جنوب شرقی و شمال شرقی دشت بیش‌تر از بخش‌های مرکزی و غربی دشت است ولی حدود گسترش محدوده‌های آسیب‌پذیری متفاوت است. مدل DRASTIC به‌طور دقیق‌تری محدوده‌های مختلف آسیب‌پذیری را مشخص کرده است. دلیل آن مشخصه‌های بیش‌تر و وزن‌دهی متفاوت مشخصه‌ها براساس نقش آن‌ها در تعیین آلودگی است.

واژگان کلیدی: آب‌های زیرزمینی، آسیب‌پذیری، دشت مرند، AVI، DRASTIC

Email:mogaddam@tabrizu.ac.ir

۱- استاد هیدروژئولوژی گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.

۳- کارشناس آب‌های زیرزمینی سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان.

مقدمه

توسعه روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی سهم عمده‌ای در آلودگی‌های محیط زیست به‌ویژه منابع آب دارد (رحمان، ۲۰۰۸: ۳۲). بنابراین فعالیت‌های انسان در بعضی از موارد به توازن‌های ظریف موجود در طبیعت آسیب می‌رساند. بعضی از این آسیب‌ها توسط طبیعت قابل جبران هستند. به عبارتی طبیعت قادر است بعضی از خرابی‌ها را ترمیم و محیط خود را تصفیه نماید (نودل و همکاران، ۲۰۰۷). 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، پیشگیری و یا مقابله با آلودگی‌ها، آن‌ها را در کنترل خود درآورد (نودل و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از مهم‌ترین منابع آبی آسیب‌پذیر در برابر آلودگی، آبخوان‌ها می‌باشند. 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 آلودکننده و مناطق آسیب‌پذیر، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مناسب می‌باشد (یابیکر، ۲۰۰۵: ۱۲۷). آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به‌ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (آنتوناکوس و لامبراکیز، ۲۰۰۷: ۲۸۸). مفهوم "توانایی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی" اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ در فرانسه برای هشدار درباره آلودگی آب ارائه شد (وربا و زاپروزک، ۱۹۹۴) و نیاز به تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در مقابل آلاینده‌ها، روز به روز افزایش می‌یابد، زیرا از طرفی آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب آشامیدنی هستند و از طرف دیگر فعالیت‌های زیاد انسانی و اقتصادی مانند فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و فعالیت‌های خانوارها، عوامل اصلی، و یا بالقوه تأثیرگذار بر آلودگی آب‌های زیرزمینی است (رحمان، ۲۰۰۸: ۳۲). در تمامی روش‌ها، آسیب‌پذیری آبخوان براساس انتقال آلودگی از سطح زمین به لایه آبدار برآورد می‌شود. تفاوت این روش‌ها در تعداد مشخصه‌های استفاده شده در ارزیابی نیروی آلودگی و امتیازات

مربوط به هر مشخصه است. روش‌های DRASTIC به‌طور وسیعی در نقاط مختلف جهان از جمله در ایالات متحده آمریکا (دورنفورد و همکاران، ۱۹۹۰: ۱۵۷)، پرتغال (لوبو- فررا و اولیویرا، ۱۹۹۷: ۱۳۲)، آفریقای جنوبی (لینچ و همکاران، ۱۹۹۷: ۵۹)، کره جنوبی (کیم و هام، ۱۹۹۹: ۲۲۷)، ژاپن (بایبکر، ۲۰۰۵: ۱۲۷، انصاف و محمد، ۲۰۰۴)، اردن (ال آدمات و همکاران، ۲۰۰۳: ۳۰۳) و بسیاری از دیگر کشورها به‌طور موردی استفاده شده است. هم‌چنین روش AVI در ایران توسط (کلانتری و همکاران، ۱۳۸۶: ۴۳۱، کلانتری و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۰) مورد استفاده قرار گرفته است.

در جنوب اردن آب‌های زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص DRASTIC در ترکیب با تجزیه و تحلیل‌های شیمیایی و آزمایش‌های آبشویی ناشی از خاکسترهای سوختن چاه‌های نفت ارزیابی شد (ال آدمات و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۰۳). بر این اساس بیشتر منطقه در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار گرفت. پتانسیل آلودگی دشت باغملک با استفاده از روش‌های GOD، DRASTIC و AVI مورد ارزیابی قرار گرفته است در این تحقیق نتایج حاصل از سه روش باهم مقایسه شده و آمده است که مدل DRASTIC به‌طور دقیق‌تری محدوده‌های مختلف دارای آلودگی را مشخص کرده است (کلانتری و همکاران، ۱۳۸۶: ۴۳۱).

آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز زاینده رود به‌روش DRASTIC، مورد ارزیابی قرار گرفته و نقشه شاخص آسیب‌پذیری منطقه تهیه شده است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۱). در این بررسی تغذیه خالص در سه وضعیت حداقل، حداکثر و متوسط در نظر گرفته شده و ۵۰ درصد حوضه در محدوده آسیب‌پذیری کم قرار گرفته است. هم‌چنین غرب حوضه حساس‌ترین منطقه نسبت به مشخصه تغذیه خالص است و این در حالی است که شرق و مرکز حوضه فاقد تغییرات شدیدی در شاخص آسیب‌پذیری در مقابل مشخصه تغذیه است. هدف از این مطالعه، تهیه نقشه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آبخوان مرند با استفاده از سه روش پرکاربرد DRASTIC، GODS، AVI و مقایسه نتایج و انتخاب بهترین روش است. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه که برای فعالیت‌های شرب، کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدیریت هرچه بهتر منابع آبی ضروری است.

مواد و روش‌ها

دشت مرند با وسعت تقریبی ۸۲۶ کیلومترمربع در شمال غرب ایران و در شمال استان آذربایجان شرقی واقع گردیده است (شکل ۱). این دشت از شمال شرق به منطقه جلغا دوزال و از شمال غرب و غرب به ترتیب به دشت هرزندات و خروجی زنونچای و زلیبیرچای و حوضه آبریز قطورچای و از جنوب به حوضه آبریز دریاچه ارومیه محدود می‌شود و بخشی از حوضه آبریز دریاچه خزر می‌باشد. کوه‌های میشو و پیرداغ در جنوب و کوه‌های بوقداغ و قلعه داغ در شمال دشت مهم‌ترین ارتفاعات منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). این دشت بین ارتفاعات محصور بوده و دارای شیب ملایمی در حدود ۵-۲ درصد از دامنه شمالی و جنوبی و شرق به طرف مرکز دشت و در نهایت قسمت غربی می‌باشد. از نظر وسعت مهم‌ترین شهرها و روستاهای منطقه مورد مطالعه به ترتیب شامل شهرهای مرند، زنون و روستاهای گله‌بان، کشکسرای و یامچی می‌باشد.

براساس داده‌های هواشناسی موجود، برای یک دوره ۳۰ ساله (۹۰-۱۳۶۰)، میانگین سالانه دمای این دشت ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه برابر ۲۵۵ میلی‌متر می‌باشد. متوسط رطوبت نسبی دشت مرند ۶۰/۲۵ و متوسط سالانه تبخیر از طشتک کلاس A ۱۴۳۶/۲ میلی‌متر در آن به دست آمده است. اقلیم حاکم بر منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن از نوع نیمه‌خشک و سرد زمستانی محاسبه شده است. مهم‌ترین سازندهای زمین شناسی که در این منطقه رخنمون دارند عبارتند از: سازندهای سلطانیه، باروت، میلا، ائوسن، میوسن، پلیوسن و هم‌چنین رسوبات آبرفتی کواترنر در بخش وسیعی از منطقه رخنمون دارند. آبخوان دشت در رسوبات آبرفتی دوران چهارم تشکیل گردیده است. این رسوبات در دامنه ارتفاعات، دانه درشت بوده و به تدریج رو به نواحی مرکزی دشت، اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد و در مرکز و منتهی الیه دشت تبدیل به رس و سیلت می‌گردد. مهم‌ترین رودخانه زلیبیرچای بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه منطقه است که از دامنه‌های جنوبی کوه سلطان جهانگیر واقع در حد مشترک حوضه حاجی‌لرچای و زلیبیرچای سرچشمه می‌گیرد و در جهت جنوب به شمال و به موازات خط تقسیم حوضه حرکت نموده و سپس به سمت غرب منحرف

هیدروژئولوژیکی استوار است (احمدی و آبرومند، ۱۳۸۸: ۱، رنگزن و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۱، ال آدمات و همکاران، ۲۰۰۳: ۳۰۳). این مدل از هفت مشخصه هیدرولوژیک قابل اندازه‌گیری و مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی که شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی یا شیب سطح زمین (T)، مواد تشکیل‌دهنده زون غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) است، تشکیل شده است (آزاد شهرکی و همکاران، ۱۳۸۹: ۶۱). این مشخصه در محیط نرم‌افزار GIS به صورت هفت لایه ظاهر می‌شود. برای تعیین اهمیت نسبی هر کدام از عوامل هفتگانه استفاده شده در مدل، هر مشخصه نسبت به سایر عوامل ارزیابی می‌شود، به طوری که به هر کدام با توجه به اهمیت تأثیر در آلودگی سیستم آب زیرزمینی یک وزن نسبی^{۱۳}، از یک تا پنج تعلق می‌گیرد که نشان‌دهنده اثر نسبی هر مشخصه بر انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی است (احمدی و آبرومند، ۱۳۸۸: ۱، اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۵). در این مدل به بازه‌های هریک از مشخصه‌های هیدرولوژیک نیز یک رتبه^{۱۴} از یک تا ده براساس تأثیرپذیری آنها بر آسیب‌پذیری، اختصاص داده می‌شود و به استفاده‌کننده از مدل این امکان را می‌دهد که مدل دراستیک را با ناحیه مورد مطالعه هم‌سنج کنند. در این روش وزن‌های عددی هر مشخصه، با استفاده از روش دلفی^{۱۵} پایه‌ریزی شده است. در روش دلفی از کارشناسان رشته هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی خواسته شده که میزان خطر مربوط به فعالیت‌های خاصی را تعیین کنند که تحت تأثیر مجموعه‌ای از شرایط اولیه انجام شود را تعیین کنند (رحمان، ۲۰۰۸: ۳۲). در پایان پس از جمع‌آوری و رقومی کردن اطلاعات هیدرولوژیکی، هفت عامل را نامبرده که نیروی آلودگی را کنترل می‌کنند، برای تهیه نقشه

- 6- Depth of Water
- 7- Net Recharge
- 8- Aquifer Media
- 9- Soil Media
- 10- Topography (slope)
- 11- Impact of Vadose Zone
- 12- Hydraulic Conductivity
- 13- Weight
- 14- Rating
- 15- Delphi Technique

آسیب‌پذیری با یکدیگر همپوشانی و تلفیق می‌شوند و یک لایه جدید به نام شاخص دراستیک^{۱۶}، طبق رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{DRASTIC index} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T + I_r I_w + Cr Cw$$

در این رابطه حروف D, I, T, S, A, R, D، مشخصه‌های تأثیرگذار در مدل دراستیک و اندیس‌های I و W به ترتیب رتبه و وزن هر مشخصه هستند، بنابراین شاخص آسیب‌پذیری ذاتی در این روش از حاصل ضرب وزن هر مشخصه در رتبه آن بدست می‌آید (اخوان، ۱۳۸۹، احمدی و برومند، ۱۳۸۸: ۱، آل‌آدامات و همکاران، ۲۰۰۳: ۳۰۳).

مشخصه‌های مدل DRASTIC

عمق سطح ایستابی

عمق آب زیرزمینی یکی از عوامل مهم در کنترل توانایی آلاینده برای رسیدن به آبخوان است. این مشخصه تعیین‌کننده عمقی است که آلوده‌کننده باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد و اهمیت زیادی دارد (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۵، خدایی و همکاران، ۱۳۸۵: ۷۳). استانداردهای رتبه‌بندی و وزن‌دهی مشخصه عمق سطح ایستابی در جدول (۲) ذکر شده است. نقشه عمق سطح ایستابی با درون‌یابی نقاط حاصل از میانگین عمق سطح ایستابی پیژومترها در محیط نرم‌افزار Arc GIS با استفاده از کریجینگ به دست آمد. قابل ذکر است که براساس مطالعات اخیر بهترین و کم‌خطاترین روش برای اینترپولاسیون در مطالعات آب‌های زیرزمینی مدل کریجینگ می‌باشد (ای اس سی بی، ۱۹۹۰: ۶۱۲، اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۵، فیجانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱)، لذا در این تحقیق از این روش استفاده شده است.

تغذیه خالص آبخوان

تغذیه خالص عامل بسیار مهمی برای نفوذ و انتقال آلاینده‌ها از منطقه غیراشباع به

منطقه اشباع است و آلاینده‌های جامد و مایع را به سطح آب برده و هم‌چنین می‌تواند سطح آب را افزایش دهد (رحمان، ۲۰۰۸: ۳۲). تغذیه بیشتر سرعت بالاتری را برای انتقال آلاینده‌ها به سطح آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هرچه تغذیه زیادتر باشد، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به علت احتمال انتقال بیش‌تر آلاینده‌ها، بیش‌تر می‌شود. برای تهیه لایه تغذیه از روش پیسکوپو^{۱۷} استفاده شد. پیسکوپو مشخصه تغذیه خالص را براساس میزان بارندگی، شیب و نفوذپذیری خاک منطقه، جایگزین روش ارائه شده به وسیله آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده کرد (پیسکوپو، ۲۰۰۱). برای محاسبه میزان تغذیه، یک مدل رقومی ارتفاعی (DEM)^{۱۸} از منطقه تهیه شد، سپس شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از معیارهای جدول (۱) طبقه‌بندی گردید.

نفوذپذیری خاک نیز با استفاده از روش‌های مختلف صحرایی و آزمایشگاهی رده‌بندی شد. در پایان تمام نقشه‌ها به فرمت رستری تبدیل شد. نقشه مربوطه به لایه تغذیه با همپوشانی نقشه شیب و نفوذپذیری خاک به‌همراه میزان بارندگی منطقه که در مورد منطقه مورد مطالعه برابر یک است (با توجه به اطلاعات هواشناسی ثبت شده مربوط به منطقه) تهیه شد. در نهایت برای به‌دست آوردن رتبه واقعی تغذیه از معیارهای جدول (۱) و بر اساس معادله پیسکوپو که به صورت رابطه (۲) می‌باشد، استفاده گردید.

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{نفوذپذیری خاک} + \text{میزان بارندگی} + \text{درصد شیب} = \text{مقدار تغذیه}$$

جدول (۱) رتبه‌بندی و وزن‌دهی مشخصه تغذیه خالص (پیسکوپو، ۲۰۰۱)

تغذیه (R)		نفوذپذیری خاک (In)		بارندگی (P)		شیب توپوگرافی (T)	
محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده (mm)	رتبه	محدوده (%)	رتبه
۱۱-۱۳	۱۰	۵	بالا	>۸۵۰	۴	<۲	۴
۹-۱۱	۸	۴	نسبتاً بالا	۷۰۰-۸۵۰	۳	۲-۱۰	۳
۷-۹	۵	۳	متوسط	۵۰۰-۷۰۰	۲	۱۰-۳۳	۲
۵-۷	۳	۲	کم	<۵۰۰	۱	>۳۳	۱
۳-۵	۱	۱	خیلی کم				

محیط آبخوان

این عامل به خصوصیات مواد تشکیل دهنده منطقه اشباع نظیر میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات و جورشدگی ذرات بستگی دارد که میزان تحرک آلودگی و به عبارتی فرایندهای رقیق‌سازی آلودگی نظیر تجزیه شیمیایی، جذب، پخش و تأخیر^{۱۹} را باعث می‌شود. اطلاعات مربوط به محیط آبخوان در دشت مرند از کاوش‌های زیرسطحی (لوگ حفاری‌های اکتشافی، پیرومتری و چاه‌های بهره‌برداری)، کاوش‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی منطقه به دست می‌آید (سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، ۱۳۸۷). بدین نحو که برحسب نسبت جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در هر چاه، رتبه‌هایی براساس جدول (۲) به هر نقطه اختصاص داده شد و سپس پلی‌گون‌هایی مربوط به نقشه محیط آبخوان، توسط نرم‌افزار GIS تهیه و نقشه نرخ‌بندی شده محیط آبخوان به فرمت رستری تهیه شد.

محیط خاک

به بخش هوازده بالایی منطقه غیر اشباع گفته می‌شود که تا حد نفوذ ریشه گیاهان ادامه دارد. این بخش از نظر فعالیت‌های بیولوژیکی و وجود مواد آلی بسیار حائز اهمیت است و میزان آب نفوذی و نیز نفوذ آلاینده‌ها را به داخل آبخوان کنترل می‌کند. این لایه با استفاده از لوگ حفاری چاه‌ها نقشه نوع و جنس خاک تا عمق ۲ متری تهیه و سپس پلی‌گون‌ها استفاده از GIS به صورت رستر، براساس روش دراستیک و جدول (۲) تهیه شد.

توپوگرافی

به تغییرات شیب سطح زمین اشاره دارد. شیب سطح زمین علاوه بر این که بر حرکت و نفوذ آب‌های سطحی و آلاینده‌ها در سطح زمین تأثیر می‌گذارد، بر گسترش خاک و در نتیجه بر میرایی^{۲۰} 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

19- Retardation

20- Attenuation

آلاینده‌ها به داخل آبخوان بیش‌تر می‌شود. برای تهیه لایه توپوگرافی ابتدا مدل رقومی ارتفاعی منطقه تهیه و سپس شیب منطقه از آن استخراج شد و با توجه به جدول (۲) رتبه‌بندی شد.

منطقه غیراشباع

شامل قسمت قرار گرفته ما بین 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. نحوه تهیه اطلاعات مربوط به منطقه غیراشباع همانند محیط آبخوان است با این تفاوت که در این مورد دانه‌بندی و خصوصیات ما بین سطح آب زیرزمینی و سطح زمین مورد توجه قرار می‌گیرد. برای تهیه لایه مربوط به محیط غیراشباع از راهنمای لوگ چاه‌های موجود در منطقه استفاده و بر پایه جدول (۲) رتبه‌بندی شد.

هدایت هیدرولیکی

توانایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در انتقال آب، هدایت هیدرولیکی نامیده می‌شود که به درصد فضاهای خالی مرتبط به هم در لایه‌های 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. اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی از محاسبات آزمایش پمپاژ حاصل می‌شود (سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، ۱۳۸۷). با توجه به آن که در آزمایش‌های پمپاژ، مقدار مشخصه قابلیت انتقال آب محاسبه می‌شود، با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع آبخوان به‌دست آمد. سپس با استفاده از تابع محاسبه‌گر رستری، از تفریق نقشه هم ضخامت آبرفت و نقشه هم عمق سطح آب، نقشه ضخامت اشباع حاصل شد و بعد از تقسیم نقشه قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت اشباع آبخوان، نقشه هدایت هیدرولیکی دشت به‌دست آمد. نقشه حاصل با توجه به جدول (۲) نمره‌دهی شد.

جدول (۲) طبقه‌بندی مربوط به مدل دراستیک و وزن‌دهی آن در منطقه مورد مطالعه

رتبه بندی	پارامتر	رتبه بندی	پارامتر
محیط آبخوان		عمق تا سطح ایستابی (متر)	
۱-۳	شیل توده‌ای	۱۰	۰-۱/۵
۲-۳	آذرین / دگرگونی	۹	۱/۵-۴/۵
۳-۵	آذرین / دگرگونی هوازده	۷	۴/۵-۹
۴-۶	یخرفت	۵	۹-۱۵
۵-۹	ماسه سنگ لایه لایه، سنگ آهک، توالی شیل‌ها	۳	۱۵-۲۳
۴-۹	ماسه سنگ توده‌ای	۲	۲۳-۳۰
۴-۹	سنگ آهک توده‌ای	۱	>۳۰
۴-۹	شن و ماسه		
۲-۱۰	بازالت دارای شکستگی		
۹-۱۰	سنگ آهک کارستی		
وزن نسبی: ۳		وزن نسبی: ۵	
محیط غیراشباع		محیط خاک	
۱	لایه محبوس کننده	۱۰	نازک یا نبود لایه خاک
۲-۶	سیلت، رس	۱۰	شن
۲-۵	شیل	۹	ماسه
۲-۷	سنگ آهک	۸	کود گیاهی (peat)
۴-۸	ماسه سنگ	۷	رس فشرده/متراکم
۴-۸	سنگ آهک لایه‌ای، ماسه سنگ، شیل	۶	لوم ماسه ای
۴-۸	ماسه و گراول با رس و سیلت زیاد	۵	لوم
۲-۸	سنگ آذرین/دگرگونی	۴	لوم سیلتی
۶-۹	ماسه و گراول	۳	لوم رس دار
۲-۱۰	بازالت	۲	کود (muck)
۸-۱۰	سنگ آهک کارستی شده	۱	رس غیر متراکم
وزن نسبی: ۵		وزن نسبی: ۲	
هدایت هیدرولیکی		توپوگرافی	
۱	۰/۵-۵	۱۰	۰-۲
۲	۵-۱۵	۹	۲-۶
۴	۱۵-۳۵	۵	۶-۱۲
۶	۳۵-۵۰	۳	۱۲-۱۸
۸	۵۰-۱۰۰	۱	۱۸<
۱۰	>۱۰۰		
وزن نسبی: ۳		وزن نسبی: ۱	

در روش دراستیک از تلفیق مشخصه‌های هفت‌گانه براساس رابطه (۱) شاخص آسیب‌پذیری به‌دست می‌آید. کلاس‌بندی و ارزش‌گذاری کلاس‌های مربوط به هر کدام از مشخصه‌ها بر اساس روش استاندارد دراستیک (آلر و همکاران، ۱۹۸۷)، در محیط GIS، انجام می‌شود. با تلفیق مشخصه‌ها، نتیجه حاصل شبکه‌ای است که بر اساس جدول (۳) طبقه‌بندی می‌شود. در این لایه سلول‌های دارای اعداد بزرگ‌تر بیان‌کننده مناطقی هستند که نیروی آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی در مقابل آلودگی در آنها بیش‌تر است و سلول‌های دارای ارزش عددی کم‌تر آسیب‌پذیری ذاتی کم‌تری دارند.

جدول (۳) محدوده شاخص آسیب‌پذیری دراستیک (Aller, et al., 1987)

محدوده آسیب‌پذیری	آسیب‌پذیری
>۷۹	بدون خطر آلودگی
۸۰-۹۹	خیلی کم
۱۰۰-۱۱۹	کم
۱۲۰-۱۳۹	کم تا متوسط
۱۴۰-۱۵۹	متوسط تا زیاد
۱۶۰-۱۷۹	زیاد
۱۸۰-۱۹۹	خیلی زیاد
>۱۹۹	کاملاً آلوده

روش AVI

در این روش با استفاده از دو پارامتر شامل ضخامت هر واحد رسوبی بالای آبخوان و هدایت هیدرولیکی تخمینی هر لایه، می‌توان شاخص آسیب‌پذیری آبخوان را تخمین زد (وان استمپ روت و همکاران، ۱۹۹۳: ۲۵). با به‌دست آوردن این پارامترها می‌توان میزان مقاومت هیدرولیکی آبخوان را مطابق رابطه (۴) زیر به‌دست آورد:

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این فرمول d ضخامت لایه‌های بالای آبخوان، n تعداد لایه‌ها و K هدایت هیدرولیکی تخمینی هر لایه (m/day) است. پارامتر C برای تعیین مقاومت آبی تارد به جریان عمودی به کار می‌رود و بعد آن زمان است که بیان‌کننده زمان حرکت آب زیرزمینی از لایه‌لای خلل و فرج سطح فوقانی بخش اشباع به سمت پایین می‌باشد. پس از محاسبه میزان شاخص آسیب‌پذیری و مقایسه آن با جدول (۹)، میزان آسیب‌پذیری آب زیرزمینی مشخص می‌شود (گاگو و داساگیز، ۲۰۰۰: ۳۳۷). برای تعیین میزان آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی مرنده به روش AVI²¹ از لوگ چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه استفاده شد (شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، ۱۳۸۷). بر طبق پیشنهاد مؤلفان در این روش (وان استمپ روت و همکاران، ۱۹۹۳: ۲۵). ابتدا مقدار مشخصه مقاومت هیدرولیکی (c) برای هر کدام از چاه‌ها محاسبه و پس از لگاریتم‌گیری از آنها، با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10 خطوط هم مقدار هیدرولیکی آبخوان رسم شد و در پایان با استفاده از جدول (۴) میزان آسیب‌پذیری آبخوان مشخص و کلاس‌بندی شد.

جدول (۴) میزان آسیب‌پذیری بر اساس مقاومت هیدرولیکی در روش AVI

مقاومت هیدرولیکی	لگاریتم مقاومت هیدرولیکی	پتانسیل آلودگی
۰-۱۰	< ۱	خیلی زیاد
۱۰-۱۰۰	۱-۲	زیاد
۱۰۰-۱۰۰۰	۲-۳	متوسط
۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۳-۴	پایین
> ۱۰۰۰۰	> ۴	خیلی پایین

یافته‌ها و بحث

نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی آبخوان مرنده در شکل ۴ نشان داده شده است. عمق برخورد به سطح ایستابی در آن از ۶ تا ۱۳۹ متغیر است. کم‌ترین عمق مربوط به قسمت‌های مرکزی و غربی دشت و بیش‌ترین عمق مربوط به شرق و جنوب شرقی دشت است. شکل ۵، تغذیه

خالص آبخوان مرند را نشان می‌دهد. براساس روش پیسکوپو برای شاخص تغذیه حداکثر نمره ۳ و حداقل نمره ۱ به‌دست آمد به‌طوری‌که قسمت عمده‌ای از منطقه دارای رتبه ۱ بود. پس مساحت زیادی از محدوده مطالعاتی سرعت کمی برای انتقال آلاینده‌ها به سطح آب زیرزمینی دارد و احتمال انتقال آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی کم است. طبق شکل ۶، محیط آبخوان دشت مرند دارای نمره‌های ۴ تا ۸ می‌باشد. پس به‌دلیل آن‌که محیط آبخوان تقریباً درشت دانه است، جریان حرکت آلاینده‌ها در سیستم آب زیرزمینی آبخوان افزایش می‌یابد. خاک‌های محدوده مطالعه بیش‌تر به‌صورت آبرفت‌های بادبزی شکل سنگریزه‌دار و بیش‌تر هموار است و عموماً جوان و فاقد تکامل و دارای بافت سبک تا متوسط همراه با سنگریزه بوده که کم‌کم به سمت پایین از میزان سنگریزه کاسته می‌شود. با توجه به شکل ۷ قسمت اعظم منطقه دارای بافت لوم ماسه‌ای (نمره ۶) و بعد از آن (نمره ۵) یعنی بافت لوم قرار دارد. وجود مواد با بافت ریز مثل سیلت توانایی انتقال آلاینده‌ها را از سطح خاک به سیستم آب زیرزمینی کاهش می‌دهد. با توجه به شکل ۸، قسمت عمده‌ای از منطقه شیب ۲-۰ درصد (رتبه ۱۰) دارد. با توجه به شیب کم منطقه، زمان تماس آب‌های سطحی و آلاینده‌ها با سطح زمین افزایش یافته و شانس بیش‌تری برای نفوذ وجود دارد و این مسئله میزان آسیب‌پذیری را در منطقه افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، قسمت مرکزی و غربی دشت دارای رتبه ۳ (سیلت و رس) ۴ و (رس سیلت و آذرین/ دگرگونی) و قسمت‌های شرقی، شمال شرقی و جنوب شرقی دارای رتبه ۶ (شن و ماسه با رس و سیلت) و ۸ (شن، ماسه) است. پس از شرق به غرب تأثیر منطقه غیراشباع کاهش می‌یابد. یعنی نقش دانه‌بندی و خصوصیات رسوبات ما بین سطح زمین و آب زیرزمینی، در مهاجرت و انتقال آلاینده‌های موجود در منطقه به آب زیرزمینی در حد متوسط تا کم بوده و نقش این مشخصه در کلاس‌بندی هدایت هیدرولیکی آبخوان مرند طبق شکل ۱۰ نشان می‌دهد که قسمت عمده آبخوان دارای هدایت هیدرولیکی ۵-۰/۵ یعنی نمره ۱ است و بعد از آن رتبه ۲ (هدایت هیدرولیکی ۱۵-۵ متر بر روز) قرار دارد. یعنی توانایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان مرند در قسمت‌های زیادی از منطقه برای انتقال آب تقریباً کم است و این مسئله امکان جریان آلاینده‌ها و پخش آنها را در سفره آبدار کاهش داده و آسیب‌پذیری را کم خواهد

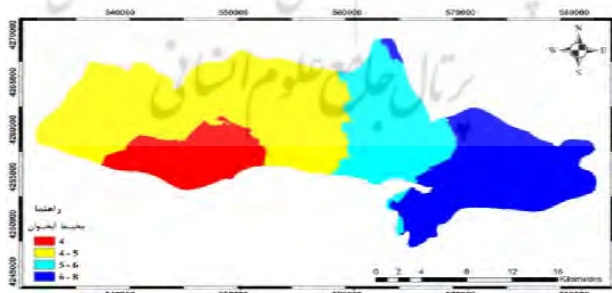
کرد این حالت در قسمت‌های مرکزی، شرقی و غربی آبخوان وجود دارد. نقشه مربوط به شاخص دراستیک آبخوان مرند در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این روش میزان آسیب‌پذیری در سه محدوده متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد.



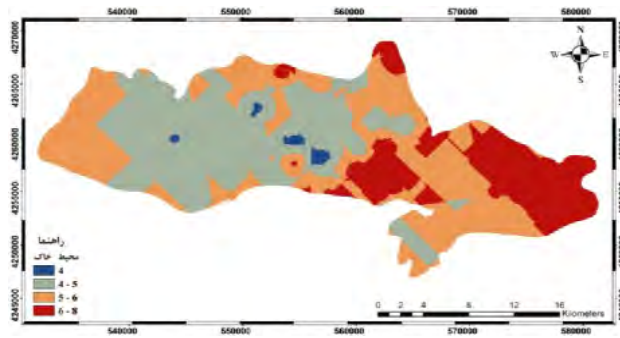
شکل (۴) نقشه پهنه‌بندی عمق آب زیرزمینی با استفاده از مدل دراستیک



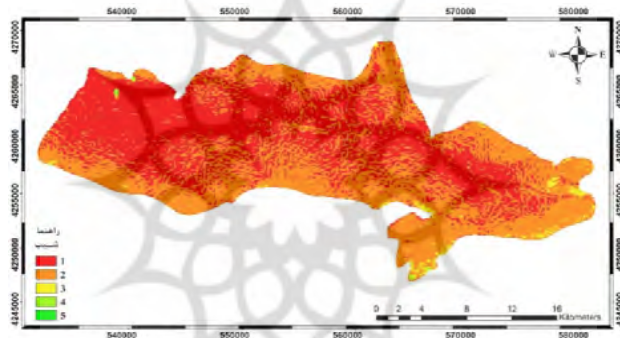
شکل (۵) نقشه پهنه‌بندی تغذیه خالص با استفاده از مدل دراستیک



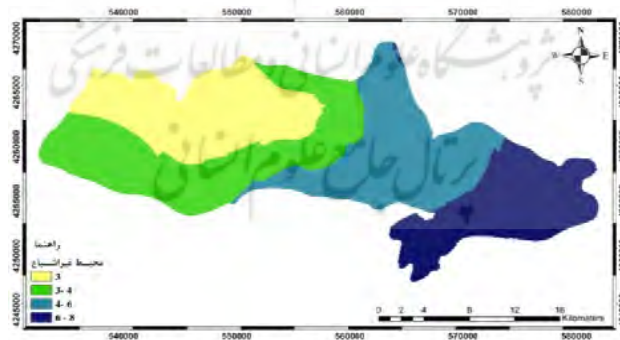
شکل (۶) نقشه پهنه‌بندی محیط آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



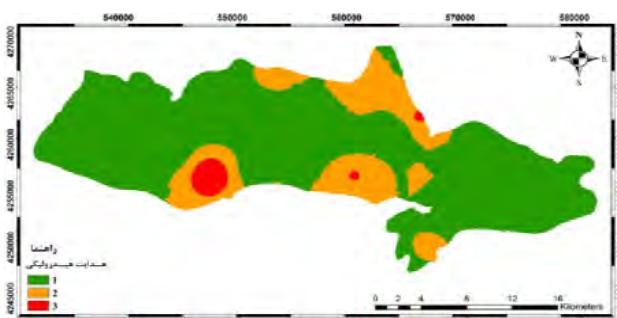
شکل (۷) نقشه پهنه‌بندی محیط خاک با استفاده از مدل دراستیک



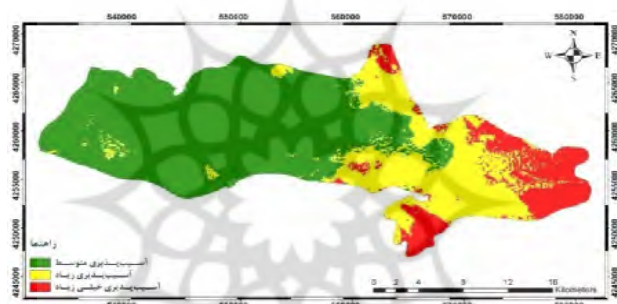
شکل (۸) نقشه پهنه‌بندی شیب با استفاده از مدل دراستیک



شکل (۹) نقشه پهنه‌بندی محیط غیراَشباع با استفاده از مدل دراستیک



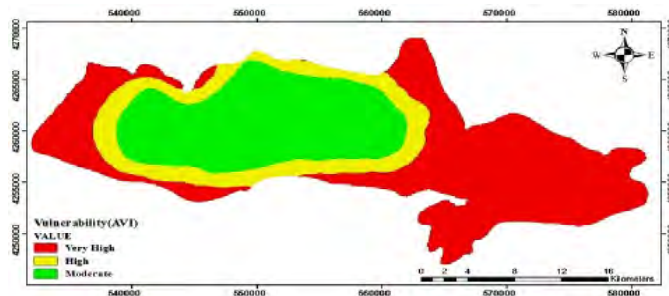
شکل (۱۰) نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی با استفاده از مدل دراستیک



شکل (۱۱) نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری با استفاده از پارامترهای هفتگانه دراستیک

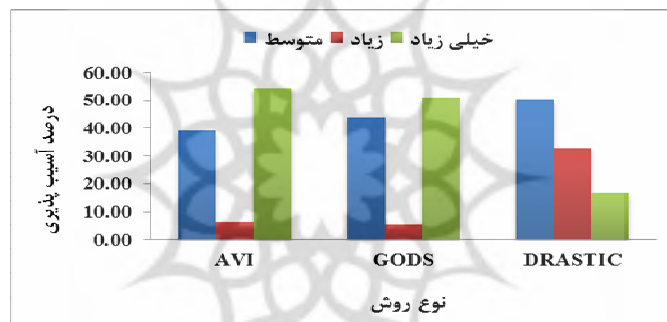
نتایج حاصل از روش AVI

مقاومت هیدرولیکی برای هر لوگ حفاری با استفاده از اطلاعات مربوط به ضخامت لایه‌های بالای سفره آبدار و هدایت هیدرولیکی هر لایه، محاسبه و پس از لگاریتم‌گیری، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10 برای کل آبخوان، میان‌یابی شد. در این روش میزان آسیب‌پذیری آبخوان مرند در محدوده < 1 تا < 3 قرار می‌گیرد یعنی آسیب‌پذیری خیلی زیاد، زیاد و متوسط قرار دارد (شکل ۱۷).



شکل (۱۷) پهنه‌بندی آسیب‌پذیری به روش AVI

در شکل (۱۸) نیز نتایج بدست آمده از هر سه روش به‌طور خلاصه نشان داده شده است.



شکل (۱۸) مقایسه نتایج حاصل از روش GODS, DRASTIC و AVI

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل دراستیک که تقریباً کامل‌ترین شاخص برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی است، آسیب‌پذیری آبخوان مرند را در سه محدوده آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب، ۵۰/۴، ۳۲/۹ و ۱۶/۱۷ درصد برآورد کرده است. نتایج روش GODS، حاکی از آن است که آبخوان مرند در سه کلاس آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با ۴۳/۸، ۵/۱۶ و ۵۱/۰۴ درصد قرار دارد. نتایج روش AVI نیز نشان می‌دهد که از آبخوان دارای آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با ۳۹/۱۳، ۶/۵ و ۵۴/۳۷ درصد می‌باشد. در سه روش عمدتاً قسمت‌های مرکزی و غربی دشت دارای آسیب‌پذیری

متوسط و قسمت‌های جنوب و جنوب شرقی و شمال شرقی دشت دارای آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد هستند. افزایش آسیب‌پذیری نواحی جنوب و جنوب شرقی و شمال شرقی به علت دانه درشت بودن رسوبات و هم‌چنین آزاد بودن آبخوان در این بخش نسبت به بخش مرکزی و غربی دشت است که بیش‌تر از آبخوان محبوس و رسوبات دانه ریز تشکیل شده‌اند. با مقایسه روش‌ها در این مطالعه می‌توان گفت که نتایج حاصل از سه روش AVI, DRASTIC و GODS جهت آسیب‌پذیری برای آبخوان مرند شباهت زیادی با هم دارند. هرچند حدود گسترش محدوده‌های آسیب‌پذیری باهم متفاوت است. در دو روش AVI و GODS محل‌های آسیب‌پذیری، بیش‌تر باهم همخوانی دارد با این تفاوت که محدوده‌های آسیب‌پذیر در روش GODS نسبت به AVI کاهش پیدا کرده است.

مدل دراستیک به‌طور دقیق‌تری محدوده‌های مختلف آسیب‌پذیری را مشخص کرده است. دلیل آن مشخصه‌های بیش‌تر و وزن‌دهی متفاوت مشخصه‌ها بر پایه نقش آنها در تعیین آلودگی است. در این روش به‌دلیل تعداد زیاد مشخصه‌ها، اثر عدم قطعیت برخی از مشخصه‌ها تا حدودی خنثی می‌شود. بدین ترتیب که در روش دراستیک در مواقعی که عدم قطعیت در یکی از مشخصه‌ها زیاد باشد، اثر آن تا حدودی توسط مشخصه‌های دیگر پوشش داده می‌شود. در حالی که در دو روش دیگر، عدم قطعیت در هر مشخصه، نتیجه پهنه‌بندی را تا حدود زیادی تغییر می‌دهد. روش GODS از چهار مشخصه استفاده می‌کند که سه مورد آنها با روش دراستیک مشترک است. فراهم آوردن اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی آسیب‌پذیری به روش GODS به‌مراتب ساده‌تر بوده و به‌هزینه کم‌تری نیاز دارد. ولی در روش GODS میزان تغذیه سطحی لحاظ نشده است که از ضعف‌های عمده این مدل محسوب می‌شود. زیرا میزان تغذیه سطحی آبخوان در آسیب‌پذیری بسیار مؤثر است. در روش AVI نیز فقط از مشخصه‌های جنس لایه‌های محیط غیراشباع و ضخامت هر یک از آن لایه‌ها استفاده شده است. پس، از دقت کم‌تری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است و می‌تواند یک ارزیابی کلی از نیروی ارزیابی ارائه دهد. از آنجا که تنها مشخصه مشترک در این سه روش محیط غیراشباع و عمق تا سطح ایستابی است، بنابراین می‌توان گفت که این دو مشخصه مهم‌ترین مشخصه‌های تأثیر گذار در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری هستند.

منابع

- اصغری مقدم، ا.؛ فیجانی، ا.؛ ندیری، ع. (۱۳۸۸)، «ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌زیرزمینی دشت‌های بازرگان و پلدشت با استفاده از مدل دراستیک براساس GIS»، *مجله محیط‌شناسی*، سال سی و پنجم، شماره ۵۲، صفحه ۵۵ تا ۵۶.
- احمدی، ع.؛ آبرومند، م. (۱۳۸۸)، «بررسی نیروی آلودگی آبخوان دشت خاش، شرق ایران، با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی»، *فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی*، سال پنجم، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۱۱.
- آزاد شهرکی، ف.؛ آغاسی، ع.؛ آزاد شهرکی، ف.؛ زارعی، ع. (۱۳۸۹)، «ارزیابی نیروی و آنالیز حساسیت آسیب‌پذیری آب‌زیرزمینی دشت هشتگرد به روش دراستیک»، *مجله آب و فاضلاب*، شماره ۲، صفحه ۶۱ تا ۷۰.
- اخوان، س.؛ (۱۳۸۹)، «استفاده از مدل‌های SWAT و DRASTIC به منظور بررسی آلودگی نیترات آب‌های زیرزمینی و ارائه راهکارهای مدیریتی در دشت همدان - بهار»، پایان‌نامه دکترای رشته آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- خدائی، ک.؛ شهسواری، ع.؛ اعتباری، ب.؛ (۱۳۸۵)، «ارزیابی آسیب‌پذیری دشت جوین به روش DRASTIC و GODS»، *فصلنامه زمین‌شناسی ایران*، سال دوم، شماره ۴، صفحه ۷۳ تا ۸۷.
- رنگرن، ک.؛ ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ.؛ میرزائی، ل.؛ علیجانی، ف. (۱۳۸۷)، «پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دست ورامین با استفاده از DRASTIC و ارزیابی تجربی اثر منطقه غیراشباع در محیط GIS»، *فصلنامه زمین‌شناسی ایران*، سال دوم، شماره ۶، صفحه ۲۱ تا ۳۲.
- رضائی، ک.؛ صفوی، ح.؛ احمدی، ا. (۱۳۹۱)، «ارزیابی و آنالیز حساسیت آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز زاینده رود در مقابل مشخصه تغذیه خالص به روش دراستیک»، *نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران*، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی (۱۳۸۷)، «طرح مطالعات نیمه‌تفضیلی منابع آب زیرزمینی محدوده مرند»، *مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی*، جلد سوم.

- کلانتری، ن.؛ فارابی، م.؛ رحیمی، م.، (۱۳۸۶)، «بررسی نیروی آلودگی آب زیرزمینی دشت باغملک با استفاده از روش AVI و مدل‌های GOD و DRASTIC در محیط GIS»، *نشریه زمین‌شناسی مهندسی*، جلد دوم، شماره ۲، صفحه ۴۳۱ تا ۴۵۰.
- کلانتری، ن.؛ سامانی، س.؛ رحیمی، م. (۱۳۹۱)، «آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت اوان به نیترات و بررسی پتانسیل و منشأ آلاینده‌گی آن»، *مجله حفاظت منابع آب و خاک*، سال اول، شماره ۳، صفحه ۳۰ تا ۳۷.
- ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee, (1990). Review of Geostatistics in Geohydrology: I. Basic Concepts. 1990, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116, (5), 612-632.
- Al-Adamat, R.A.N., I.D.L, Foster, S.M.J., Baban (2003), "Groundwater vulnerability and riskmapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC", *Applied Geography*, 23, 303-324.
- Al-Adamat, R.A.N., A., Al-Harashsheh, M., Al-Farajat (2010), "The use of GIS and leachability tests to investigate groundwater vulnerability to pollution from oil shale utilization at Lajjoun area/southern Jordan", *Jordan Journal of Civil Engineering*; 3, 253-263.
- Aller, L., et al. (1987), "DRASTIC: A Standardized System for Evaluatin Ground Water Pollution Potentialusing hydrogeologica settings", *EPA 600/2-87-035*, 1987. 622.
- Antonakos, A.K., N.J., Lambrakis (2007), "Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece", *Journal of Hydrology* 333, 288-304.
- Babiker, S., Mohamed, A., Hiyama, T. & Kato, K., (2005), "A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Height, ifu Prefecture, central Japan", *Scienc of the Total Environment*, 345, 127-140.

- Chilton, P.J., Vlugman, A. & Foster, S., (1990), "A groundwater pollution risk assessment for public water supply sources in Barbados", *American Water Resources Association International Conference on Tropical Hydrology and Caribbean Water resources, San Juan de Puerto Rico*, 279-289.
- Durnford, D.S., Thompson, K.R., Ellerbrook, D.A., Loftis, J.C. & Davies, G.S., (1990), "Screening methods for ground water pollution potential from pesticide use in Colorado agriculture" *Colorado Water Resources Research Institute*, Fort Collins, Completion Report No. 157, 165.
- Fijani, E., et al. (2013), "Optimization of DRASTIC Method by Supervised Committee Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran" *Journal of Hydrology*, (503), 89-100.
- Gogu, R.C. & Dassargues, A., (2000), "Sensitivity Analysis for the EPIK Method of Vulnerability Assessment in a Small Karstic Aquifer, Southern Belgium", *Hydrogeology Journal*, Vol. 8(3): 337-345.
- Insaf, S., Mohamed, A.A., Tetsuya and Kikuo K., (2004), "A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights", Gifu Prefecture, central Japan, *Journal of Science of the Total Environment*, vol. xxx- xxx.
- Kim, Y.J. and Hamm, S., (1999), "Assessment of the potential for ground water contamination using the DRASTIC/ EGIS technique, Cheongju area, South Korea", *Hydrogeolog Journal* 7, No. 2, 227-235.
- Knodel, K., Lange, G., and Voigt, H.J. (2007), "Environmental Geology", Handbook Field Methods and Case Studies, *Springer Verlag, Berlin Heidelberg*, p 1357.
- LoboFerreira, J.P. and Oliveira, M., (1997), "DRASTIC ground water vulnerability mapping of Portugal", *Proceedings from the 27th Congress of the International Association for Hydraulic Research*, San Francisco, USA, 132-137.

- Lynch, S.D., Reynders, A.G. and Schulze, R.E., (1997), "A DRASTIC approach to ground water vulnerability in South Africa", *South African Journal of Science*, No. 2, 93, 59-60.
- Paez, G., (1990), "*Evaluacion de la vulnerabilidad a la contaminacion de las aguas subterranas en el Valle del Cauca*", Informe Ejecutivo, Corporeginal del Valle del Cauca, Cauca, Colombia.
- Piscopo, G. (2001), "Groundwater vulnerability map", explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia.
- Polemio, M.D., Casarano, P.P., Limoni (2009), "Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy)". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1461-1470.
- Rahman, A. (2008), "A GIS Based DRASTIC model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh", India, *Applied Geography*, 28: 32-53.
- Rangzan, K., Firuzabadi, P., Mirzaee, L., and Alijani, F. (2008), "Interpolation varamin plain aquifer vulnerability by the DRASTIC models, experimental evaluation of unsaturated region in GIS environment", *Iranian Geology Journal*, 6: 21- 32 (in Persian).
- Van Stemproot, D., Evert, L., & Wassenaar, L. (1993), "Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping", *Canadian Water Resources Journal*. 18: 25-37.
- Vrba, J. & Zoporozec, A., (1994), "*Guidebook on mapping groundwater vulnerability*", Int. Assoc.