

Determination of Aquifer Vulnerability in Lordegan Aquifer Using DRASTIC, AVI and GODS Models

Majid Ghanbarian

MSc, Department of Environmental science, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Mozhgan Ahmadi Nadoushan

* Assistant professor, Department of Environmental science, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. (Corresponding Author): Email:m.ahmadi@khuisf.ac.ir, m.ahmadi1984@gmail. Com.

Received: 2018/08/03

Accepted: 2018/11/11

Document Type: Research article

ABSTRACT

Background and Aim: Groundwater vulnerability assessment is regarded as a main part of water resources management. In this study, the vulnerability of Lordegan Plain Aquifer is evaluated using DRASTIC, GODS, AVI and ArcGIS 10.5 softwares.

Materials and Methods: The Modified DRASTIC model containing eight parameters, is a model to study the hydrogeological properties affecting groundwater pollution. By weighting and combining these parameters in the ArcGIS 10.5, vulnerable areas of the aquifer to pollution were identified. AVI method measured groundwater vulnerability using two physical parameters including the thickness of each sedimentary rock above the uppermost saturated aquifer surface and estimated hydraulic conductivity. GODS model assessed aquifer vulnerability based on four layers of aquifer type, unsaturated area, surface depth and soil type. At first, information related to the three models was collected and the corresponding layers were logged into the ArcGIS software. Using the overlapping Methods: and applying the weights on each layer, the final vulnerability maps of the area were prepared in three ways. Sensitivity analysis was used to show the effectiveness of the parameters used to evaluate the vulnerability index.

Results: The results of this study showed that based on modified DRASTIC model, 14, 76 and 10% of the study area had a moderate, high and very high potential vulnerability to pollution, respectively. The results of AVI model showed that more than 95% of the aquifers had high sensitivity to pollution. The results of the GODS model indicated that 45.3 % of the region was in low vulnerability class and the rest in the middle vulnerability class.

Conclusion: The results of this study showed that the modified model is more reliable than other used models. Results indicated that vulnerability assessment models provides valuable tools for authorities and decision makers to manage the Lordegan aquifer.

Keywords: Vulnerability, DRASTIC, GODS, AVI, Lordegan aquifer

► **Citation:** Ghanbarian M, Ahmadi Nadoushan M. Determination of Aquifer Vulnerability in Lordegan Aquifer Using DRASTIC, AVI and GODS Models. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Winter 2019;4 (4): 257-271 .

ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت لردگان با استفاده از مدل‌های GODS، AVI و DRASTIC

مجید قنبریان

کارشناسی ارشد آلودگی های محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

مزگان احمدی ندوشن

* استادیار، گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

نویسنده مسئول:

m.ahmadi1984@gmail.com,
m.ahmadi@khuisf.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

چکیده

زمینه و هدف: ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، بخش مهمی از مدیریت منابع آبی است. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت لردگان با استفاده از مدل‌های دراستیک، گادز، ای وی آی و نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی نسخه ۱۰/۵ انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: مدل دراستیک اصلاح شده، مدلی است که خصوصیات هیدروژئولوژیکی مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی را با استفاده از ۸ لایه بررسی کرد و با امتیازدهی و ترکیب این پارامترها در محیط جی ای اس، مناطق آسیب پذیر آبخوان را مشخص کرد. در مدل ای وی آی فقط بر اساس دو پارامتر، ضخامت آبخوان، منطقه غیراشباع، عمق سطح ایستابی و نوع خاک به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان استفاده شد. ابتدا اطلاعات مرتبط با سه مدل جمع آوری گردید و لایه های مربوطه پس از ورود به نرم افزار جی ای اس تهیه شد و با استفاده از روش های همپوشانی و اعمال ضرایب وزنی موردنظر بر روی هر لایه، نقشه های نهایی آسیب پذیری منطقه به سه روش تهیه شد. جهت اعتبارسنجی نتایج و تعیین اولویت پارامترها از آنالیز حساسیت استفاده شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج تحقیق، به ترتیب ۱۴٪، ۷۶٪ و ۱۰٪ از مساحت منطقه دارای پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد بودند. بر اساس نتایج مدل ای وی آی، بیش از ۹۵٪ آبخوان در طبقه با حساسیت بالا قرار داشت. بر اساس مدل گادز، ۳/۴۵٪ از منطقه در کلاس آسیب‌پذیری کم و مابقی در کلاس متوسط قرار داشت.

نتیجه‌گیری: آنچه که از نتایج این مطالعه برمی آید مدل دراستیک اصلاح شده از صحت قابل قبول‌تری برخوردار است. مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، ابزارهای بسیار ارزشمندی برای مسئولان فراهم کرده تا بتوانند تصمیمات لازم را در جهت مدیریت آبخوان دشت لردگان اتخاذ کنند.

کلید واژه‌ها: آبخوان دشت لردگان، آسیب‌پذیری، دراستیک، گادز، ای وی آی

◀ **استناد:** قنبریان م، احمدی ندوشن م. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت لردگان با استفاده از مدل‌های ای وی آی، گادز و دراستیک. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. زمستان ۱۳۹۷؛ ۴(۴): ۲۵۷-۲۷۱.

با توجه به افزایش نیاز میرم به آب و اینکه تنها منبع مطمئن بهره‌برداری در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، سفره آب زیرزمینی می‌باشد، لذا نقش مدیریت صحیح بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی آشکار می‌شود. نحوه مدیریت این منابع باید به صورتی باشد که از اثرات زیان‌آوری مانند برداشت مازاد، نامناسب شدن کیفیت آب و اثر آن روی آب آشامیدنی و محصولات کشاورزی و نشست زمین بر اثر برداشت بیش از اندازه آب چه در حال و آینده جلوگیری نماید (۱). در مناطق خشک و نیمه‌خشک در اغلب موارد از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین آب آشامیدنی استفاده می‌گردد. زندگی در مناطق خشک و کویری جهان تا حدود زیادی به وجود آب‌های زیرزمینی بستگی دارد (۲). آلودگی آب‌های زیرزمینی، یک مسأله مهم است؛ به ویژه در مناطقی که کودها به‌طور گسترده در زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳).

توسعه روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی، سهم عمده‌ای در آلودگی‌های محیط زیست به‌ویژه در بخش آب دارد. آبخوان‌های محصور نشده و نفوذپذیر، قابلیت زیادی برای آلودگی و آسیب‌پذیری دارد. آب‌های زیرزمینی به دلیل قابلیت کمتر برای آلودگی و همچنین ظرفیت زیاد ذخیره نسبت به آب‌های سطحی، به عنوان منبع مهمی در منابع آب مورد توجه است. وجود منابع مهم آلاینده‌های انتشاری و نقطه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در سطح زمین و نفوذ این آلاینده‌ها به آبخوان، سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین، در مدیریت منابع آب زیرزمینی جلوگیری از آلودگی این آب‌ها ضروری است. آبخوان‌ها به شکل‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارند که تشخیص و کنترل آلودگی در آن‌ها نسبت به آب‌های سطحی، مشکل‌تر و پرهزینه‌تر می‌باشد (۴). در حال حاضر، بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف آب کشور به‌خصوص در بخش شرب، توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که عمدتاً آبخوان‌های آزاد می‌باشد؛ در صورتی که این آبخوان‌ها از آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به آلاینده‌های ناشی

از فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهرنشینی برخوردار هستند. ارزیابی آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان برای مدیریت، توسعه و تخصیص کاربری اراضی، نحوه پایش کیفیت، پیشگیری و حفاظت از آلودگی آب‌های زیرزمینی ضروری است (۵). فعالیت‌های انسانی در دهه‌های اخیر، محیط آسیب‌پذیری را به وجود آورده است؛ به‌گونه‌ای که آب زیرزمینی به عنوان منبعی طبیعی در معرض آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی قرار گرفته است (۶).

یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی‌های آب زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و حساس آبخوان است (۸،۷). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، یک روش معمول برای بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی و نیز یک وظیفه مهم در مدیریت اراضی و منابع آبی است (۹،۳). مدیریت آب‌های زیرزمینی می‌تواند به طور مؤثر به‌وسیله ارزیابی نقشه‌های آلودگی آب‌های زیرزمینی انجام گیرد. ارزیابی آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان برای مدیریت، توسعه و تخصیص کاربری اراضی، نحوه پایش کیفیت، پیشگیری و حفاظت از آلودگی آب‌های زیرزمینی ضروری است (۵). استفاده از روش مناسب برای تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در یک منطقه بستگی به وجود داده‌ها و توزیع آن‌ها، موقعیت هیدروژئولوژی و مقیاس و هدف نقشه دارد (۱۰).

روش‌های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک آبخوان وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های همپوشانی (گادز، دراستیک، سینتکس، ای وی آی)، روش‌های آماری و روش‌های ریاضی اشاره کرد (۱۱-۱۳). سامانه اطلاعات جغرافیایی، به دلیل ویژگی‌ها و توانایی‌های خاص خود، در بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی می‌تواند ابزاری بسیار مفید باشد. این

1. Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth of water table, soil type (GODS)
2. Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone media, and hydraulic Conductivity of the aquifer (DRASTIC)
3. Water table depth (S), Effective infiltration (I), Unsaturated zone (N), Soil media (T), Aquifer media (A), Hydraulic conductivity zone (C), Topographic slope (S) (SINTAC)
4. Aquifer Vulnerability Index (AVI)

سامانه قابلیت جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تجزیه و تحلیل همزمان پارامترهای مختلف را دارد و نمایش داده 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، قابلیت‌های ویرایشی، به‌هنگام‌سازی سریع داده‌ها، مدل‌سازی و تهیه گزارش به اشکال متعدد، از ویژگی‌های دیگر این سامانه می‌باشد (۱۴). سیستم اطلاعات جغرافیایی علاوه بر سودآوری بسیار، باعث تسریع در روند انجام کار، برنامه‌ریزی‌ها، تشخیص موارد بحرانی و ... می‌گردد. توانایی این سیستم در مدیریت، برنامه‌ریزی و همچنین تجزیه و تحلیل‌های قوی آماری باعث شده که بسیاری از افراد در امور مختلف از آن به عنوان ابزاری قوی در تصمیم‌گیری‌ها استفاده نمایند (۱۵).

در سال‌های اخیر مطالعاتی در خصوص استفاده از شاخص‌های گوناگون جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد. لساگنا و همکاران طی مطالعه‌ای که به بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی شمال غربی ایتالیا پرداختند، از روش دراستیک اصلاح شده بهره گرفتند. همچنین از مقادیر نیترات جهت صحت‌سنجی استفاده شد. نتایج بیانگر عدم همبستگی بین میزان آسیب‌پذیری و نیترات بود و این می‌تواند به دلیل عدم توانایی نیترات در ردیابی فعالیت‌های شیمیایی آب زیرزمینی باشد، زیرا نیترات تنها یک نشانه از فعالیت‌های فیزیکی و زیستی در آب زیرزمینی است (۱۶). احمد و نازال به منظور بررسی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی در منطقه‌ای در غرب ریاض در کشور عربستان سعودی از مدل دراستیک در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده کردند. نقشه آسیب‌پذیری به‌دست آمده، منطقه را به دو قسمت آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی کرد. در این تحقیق، برای ارزیابی اثر انسان بر آب‌های زیرزمینی، الگوی کاربری اراضی به عنوان یک لایه ورودی اضافی، به مدل اضافه شد (۱۷). ژائو و ساکو، نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت ورچیلی در ایتالیا را با استفاده از مدل دراستیک اصلاح شده و سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه کردند. نتایج

تحقیق نشان داد منطقه مورد مطالعه از نظر خطر آسیب‌پذیری، در وضعیت آسیب‌پذیری متوسط و زیاد قرار دارد. نتایج آزمایش همچنین نشان‌دهنده ارتباط مثبت غلظت سموم کشاورزی و آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی بود (۱۸).

تهیه نقشه آسیب‌پذیری دشت‌ها، ابزاری کاملاً مفید برای برنامه‌ریزی و اعمال تصمیمات مناسب در مدیریت آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت دشت لردگان در بخش کشاورزی، صنعت و شرب و توسعه روزافزون شهرک‌های صنعتی در این بخش و ورود فاضلاب‌ها و پسماندهای صنعتی و کشاورزی به داخل منابع آب زیرزمینی، شناسایی مناطق و میزان آسیب‌پذیری این دشت یک امر ضروری می‌باشد تا با شناخت کافی از میزان آسیب‌پذیری منطقه، از آلوده شدن هرچه بیشتر این منابع تجدیدناپذیر جلوگیری کرد، لذا مطالعه حاضر با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت لردگان و نیز بررسی کارایی مدل‌های گوناگون در بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از سه مدل DRASTIC، GODS و AVI انجام شد.

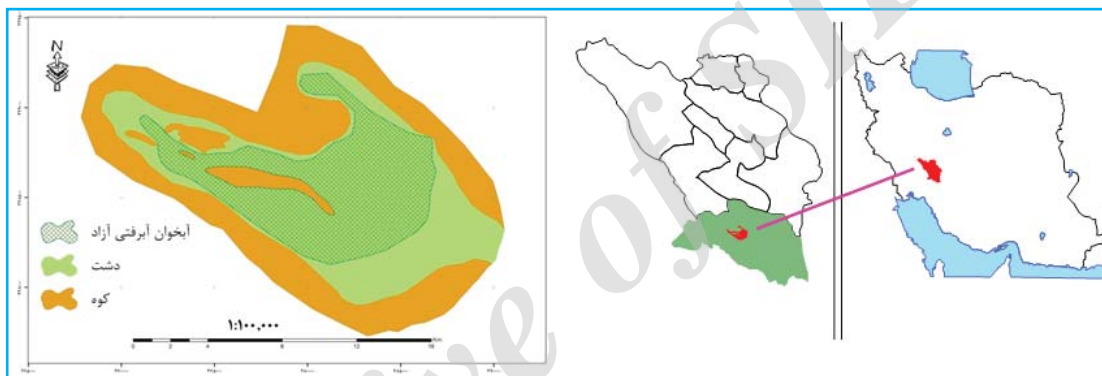
روش کار

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، آبخوان دشت لردگان بود که از نظر تقسیمات کشوری، بخشی از استان چهارمحال و بختیاری را شامل می‌شود که در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری جنوب شهرکرد قرار گرفته است. این منطقه بین سلسله جبال زاگرس با مختصات ۳۴۷۷۶۲۳ تا ۳۴۸۱۰۵۷ عرض‌شمالی و ۴۷۲۸۱۱ تا ۴۷۸۵۲۰ طول‌شرقی واقع می‌باشد. حداکثر طول تقریبی حدود ۲۰ کیلومتر از شرق به غرب و حداقل عرض تقریبی حدود ۹ کیلومتر از شمال به جنوب امتداد دارد. بیشینه ارتفاع حوضه برابر ۲۶۹۰ متر، کمینه آن برابر ۱۷۰۳ متر و متوسط ارتفاع آن برابر ۱۹۲۰ متر است. مساحت کل حوضه آبریز محدوده مطالعاتی لردگان حدود ۴۵۶/۵ کیلومتر مربع بوده که ۲۵۹/۴ کیلومتر مربع (معادل ۵۶٪) آن را دشت و مابقی آن را

بحرانی شدن این دشت و آبخوان موجود در آن به شمار می‌روند. با توجه به اهمیت دشت لردگان در بخش کشاورزی، صنعت و شرب و توسعه روزافزون شهرک‌های صنعتی در این بخش و ورود فاضلاب‌ها و پسماندهای صنعتی و کشاورزی به داخل منابع آب زیرزمینی، شناسایی مناطق و میزان آسیب پذیری دشت یک امر ضروری می‌باشد تا با شناخت کافی از میزان آسیب پذیری منطقه، از آلوده شدن هرچه بیشتر این منابع تجدیدنپذیر، جلوگیری کرد. موقعیت محدوده آبخوان دشت لردگان در استان چهارمحال و بختیاری در شکل ۱ نشان داده شده است.

ارتفاعات تشکیل داده است. این محدوده از شمال با حوضه آبریز ارمند، از غرب با حوضه آبریز کارون ۳، از جنوب با حوضه آبریز خرسان و از شرق با حوضه آبریز رودخانه ونک و خرسان همجوار می‌باشد. آبخوان دشت لردگان از لحاظ وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در حالت ممنوعه می‌باشد و در آینده‌ای نه چندان دور با شرایطی بحرانی از لحاظ تأمین آب روبه‌رو خواهد بود. علت انتخاب این دشت، شرایط بحرانی آن می‌باشد. توسعه مناطق شهرنشینی، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و مصرف کود و همچنین افزایش واحدهای صنعتی موجود در دشت، از جمله دلایل



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

شاخص‌های آسیب پذیری

شاخص AVI

در این روش، بر اساس دو پارامتر زیر شاخص آسیب پذیری سفره تعیین می‌شود. با دانستن ضخامت هر یک از واحدهای رسوبی در آبخوان (d) و ضریب هدایتی هیدرولیکی هر یک از لایه‌ها (K)، مقاومت هیدرولیکی آبخوان طبق رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \quad (1)$$

که در آن C مقاومت هیدرولیکی، n تعداد لایه‌ها و K هدایت هیدرولیکی در هر یک از لایه‌ها می‌باشد. فاکتورهایی از قبیل گرادیان هیدرولیکی انتشار و جذب قابل توجه نمی‌باشند. مقادیر ضخامت واحدهای رسوبی در این مطالعه، از لوگ چاه‌های اکتشافی به دست آمد، اما برای به دست آوردن هدایت هیدرولیکی آبخوان از آزمون پمپاژ استفاده شد؛ به گونه‌ای که نتیجه آزمون پمپاژ،

در این تحقیق، ارزیابی آسیب پذیری در محیط GIS با استفاده از مدل‌های GODS، DRASTIC و AVI انجام شد. بدین منظور، آمار و اطلاعات موجود وارد پایگاه اطلاعاتی GIS گردید. از منابع اطلاعاتی گوناگونی از جمله نقشه‌های توپوگرافی (سازمان زمین‌شناسی کشور)، نقشه خاک، آمار هواشناسی، هیدرولوژی، سطح آب زیرزمینی، نتایج آزمایشات پمپاژ، لوگ حفاری چاه‌های مشاهده‌ای، اکتشافی و بهره‌برداری، نقشه‌های مطالعات ژئوفیزیک و آمار منابع آب استفاده شد. این داده‌ها از سازمان‌هایی مانند شرکت مدیریت منابع ایران، شرکت آب منطقه‌ای استان، شرکت سهامی آب منطقه‌ای لردگان، سازمان جهاد کشاورزی استان و مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شد. اطلاعات نقشه‌ای (مانند نقشه‌های توپوگرافی و خاک‌شناسی) پس از رقومی شدن و اطلاعات جدولی مانند سطح آب زیرزمینی، به فرمت بانک اطلاعاتی تبدیل و وارد پایگاه اطلاعاتی گردید و برای تهیه لایه‌های مورد نیاز از نرم‌افزار ArcGIS ۱۰/۵ استفاده شد.

پارامتری به نام قابلیت انتقال آبخوان (T) می‌باشد که با تقسیم کردن بر ضخامت آبخوان، (K) یا همان هدایت هیدرولیکی به دست می‌آید. مقادیر C و یا Log C را می‌توان به صورت مستقیم برای ایجاد نقشه‌های هم‌مقاومت به کار برد. با در دست داشتن مقدار C و یا Log C و با استفاده از جدول تنظیم شده این روش، مقدار شاخص آسیب‌پذیری سفره تعیین می‌شود.

شاخص دراستیک اصلاح شده^۱

روش دراستیک، پرکاربردترین روش نسبت به روش‌های رتبه‌دهی دیگر است، از این رو در انجام این تحقیق نیز از این روش استفاده شد. همچنین از آنجایی که در این روش تعداد پارامترهای بیشتری دخیل می‌باشند، لذا می‌توان ادعا نمود که این روش نسبت به سایر روش‌ها از تکامل بیشتری برخوردار است. این روش که توسط سازمان محیط زیست آمریکا توسعه یافته است، دارای ۷ پارامتر: عمق تا سطح آب زیرزمینی، تغذیه خالص، خصوصیات خاک، خصوصیات سفره، توپوگرافی، اثر منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان می‌باشد. با اضافه کردن نقشه کاربری اراضی به شاخص دراستیک، این شاخص به شاخص دراستیک اصلاح شده تبدیل می‌شود که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

نقشه پارامترهای مدل دراستیک

عمق سطح آب زیرزمینی (D): عمقی که آلودگی باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد، عمق سطح می‌باشد. هر چه سطح آب عمیق‌تر باشد، باعث می‌شود که زمان حرکت و ماندگاری آلودگی افزایش یابد و به این ترتیب ظرفیت میرایی با افزایش عمق سطح ایستابی افزایش می‌یابد (۲۰). جهت بررسی عمق سطح آب زیرزمینی از داده‌های چاه‌های مربوط به شبکه پی‌زومتری استفاده شد. پس از تفکیک چاه‌های مورد نیاز و موجود در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ، نقشه پهنه‌بندی عمق تا سطح ایستابی در محیط نرم‌افزار ArcGIS ۱۰/۵ تهیه گردید. جدول ۱، پارامترها و رتبه‌بندی پارامترها در مدل دراستیک را نشان می‌دهد.

تغذیه خالص آبخوان (R): تغذیه موجب می‌شود که آلودگی به صورت عمودی انتقال یافته و به سطح ایستابی برسد و به صورت افقی در آبخوان منتشر شود. معمولاً هرچه تغذیه بیشتر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی بیشتر است. به منظور تهیه نقشه ارزش‌گذاری شده تغذیه خالص آبخوان دشت لردگان، از رابطه ۲ که توسط پیسکویو و پلیشر پیشنهاد شده است، استفاده گردید (۲۱).

(۲) تغذیه = شیب (درصد) + فاکتور بارش + فاکتور نفوذپذیری خاک
نقشه بارش با استفاده از داده‌های میانگین بارش سالانه ۲۰ ساله از ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه تهیه شد. نقشه نفوذپذیری خاک بر اساس آمار موجود در آرشیو مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه و بر اساس الگوی نفوذپذیری به پنج دسته تقسیم‌بندی شد. سه فاکتور (شیب، بارش، نفوذپذیری) با یکدیگر جمع شدند و سپس نقشه بر اساس طبقه‌بندی مندرج در جدول ۱ طبقه‌بندی شد. در نقشه حاصل که نقشه تغذیه خالص است، تغذیه بیشتر، عدد بالاتری به خود اختصاص می‌دهد.

محیط آبخوان (A): محیط آبخوان و مواد تشکیل‌دهنده آن، تعیین‌کننده طول و چگونگی روند مسیر جریان آب زیرزمینی در سفره می‌باشد. طول مسیر در تعیین زمان لازم برای فرآیندهای میرایی نظیر جذب، واکنش‌های شیمیایی و پراکنش از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. محیط آبخوان همچنین بر مقدار سطح مؤثر موادی که با آلوده‌کننده در تماس هستند، مؤثر است (۲۲). در این تحقیق این پارامتر با استفاده از خصوصیات پروفیل خاک‌ها از قبیل مشخصات طبقات خاک، رنگ، بافت، ساختمان و همچنین آمار و اطلاعات موجود در آرشیو مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص شده است، محیط آبخوان از نظر مواد تشکیل‌دهنده به ۱۰ دسته طبقه‌بندی شده است که قسمت‌هایی از آبخوان که از شیل توده‌ای تشکیل شده‌اند، کمترین رتبه (۲) و قسمت‌هایی از آبخوان که مواد تشکیل‌دهنده آن سنگ آهک می‌باشند، بیشترین رتبه (۱۰) را دارا می‌باشند. به منظور تهیه این پارامتر از اطلاعات لوگ چاه‌های اکتشافی موجود در دشت لردگان استفاده شد؛ بدین صورت که

1. Modified DRASTIC

جدول ۱. پارامترها و محدوده‌های روش دراستیک

وزن	رتبه بندی	محدوده	پارامتر	وزن	رتبه بندی	محدوده	پارامتر		
	۹	نازک یا نبود لایه خاک	نوع خاک		۱۰	۰-۱/۵	عمق آب زیرزمینی		
	۱۰	شن			۹	۱/۵-۴/۵			
	۹	ماسه			۷	۴/۵-۹			
	۸	کود گیاهی (peat)			۵	۹-۱۵			
	۷	رس فشرده/یا متراکم			۳	۱۵-۲۳			
۲	۶	لوم ماسه‌ای			۲	۲۳-۳۰			
	۵	لوم			۱	>۳۰			
	۴	لوم سیلتی			۱۱-۱۳	۱۰			
	۳	لوم رس‌دار			۹-۱۱	۸			
	۲	کود (muck)			۴	۷-۹		۵	تغذیه خالص
	۱	رس غیرمتراکم			۵-۷	۳			
	۱	لایه محبوس کننده			۳-۵	۱			
	۳	سیلت / رس			۲	شیل توده‌ای			
	۳	شیل			۳	آذرین / دگرگونی			
	۳	سنگ آهک			۴	آذرین / دگرگونی هوازده			
	۴	ماسه سنگ			۵	یخ رفت‌ها			
۵	۵	ماسه سنگ، سنگ آهک و شیل‌های لایه لایه	اثر منطقه غیراشباع	۳	۶	ماسه سنگ لایه لایه، سنگ آهک و توالی شیل‌ها	محیط آبخوان		
	۶	شن و ماسه با مقدار زیادی رس و سیلت			۶	ماسه سنگ توده‌ای			
	۸	شن و ماسه			۸	سنگ آهک توده‌ای			
	۹	بازالت			۸	شن، ماسه و سیلت			
	۱۰	سنگ آهک کارستی			۹	بازالت			
	۱	۰/۰۴-۴/۱			۱۰	سنگ آهک کارستی			
	۲	۴/۱-۱۲/۳			۱۰	۰-۲			
	۴	۱۲/۳-۲۸/۷	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)		۹	۲-۶			
۳	۶	۲۸/۷-۴۱			۱	۵		۶-۱۲	توپوگرافی
	۸	۴۱-۸۲				۳		۱۲-۱۸	
	۱۰	<۸۲				۱	<۱۸		

بر حسب نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر چاه، مشاهده‌ای رتبه‌ای بین ۲ تا ۱۰ بر اساس جدول ۱ به هر نقطه اختصاص داده شد.

نوع خاک (S): نوع خاک، تأثیر بسیار مهمی در تغذیه دارد و از این رو بر چگونگی حرکت آلوده‌کننده مؤث است. وجود مواد با بافت ریزدانه نظیر سیلت و رس، تراوایی نسبی خاک را کاهش می‌دهد و مهاجرت و حرکت آلوده‌کننده‌ها را محدود می‌سازد. فعالیت نسبتاً بالای میکروبی، وجود مواد آلی و ریشه گیاهان، باعث افزایش ظرفیت میرایی لایه خاک نسبت به بخش‌های زیرین منطقه غیراشباع می‌شود. علاوه بر این جایی که افق خاک ضخیم باشد، فرآیندهای میرایی نفوذ، جذب و فرار گازها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. محیط خاک بر حسب رده‌بندی بافتی آن مشخص می‌شود و بر اساس پتانسیل آلودگی امتیازبندی می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص شده است، محیط خاک از نظر مواد تشکیل دهنده به ۱۱ دسته طبقه‌بندی شده است که قسمت‌هایی از آبخوان با نوع خاک شن، بیشترین رتبه (۱۰) و قسمت‌هایی از آبخوان با نوع خاک رس غیرمترکم، کمترین رتبه (۱) را به خود اختصاص داده‌اند.

توپوگرافی (T): توپوگرافی به صورت شیب و تغییر شیب سطح زمین مورد توجه قرار می‌گیرد. توپوگرافی به کنترل حرکت آلودگی و یا نگهداری آن بر روی سطح زمین کمک می‌کند. شیب‌هایی که فرصت نفوذ بالاتری را فراهم می‌کنند، پتانسیل آلودگی بالاتری را دارند (۲۳). درصد شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و ابزار Spatial analyst نرم‌افزار ArcGIS ۱۰/۵ محاسبه می‌شود. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص شده است، مدل تراستیک منطقه را از نظر شیب به ۵ دسته تقسیم می‌کند که شیب‌های کمتر از ۲٪ به دلیل ایجاد پتانسیل آلودگی بیشتر، بیشترین رتبه (۱۰) و شیب‌های بیشتر از ۱۸٪ به دلیل ایجاد پتانسیل آلودگی کمتر، کمترین رتبه را به خود اختصاص می‌دهند.

اثر منطقه غیراشباع (I): نوع محیط منطقه غیراشباع، تعیین‌کننده خصوصیات میرایی مواد تشکیل دهنده منطقه خاک و سنگ‌های بالای سطح ایستابی است. محیط منطقه غیراشباع، طول مسیر

و چگونگی روند حرکت آلوده‌کننده را در کنترل دارد و از این رو بر زمان لازم برای مقدار و میرایی موادی که در برخورد با آلودگی هستند، مؤثر است (۲۳). نقشه زمین‌شناسی شیت لردگان از سایت زمین‌شناسی ایران دریافت شد و با تلفیق آن با مطالعات نیمه تفصیلی دشت لردگان، کلیه سازندهای زمین‌شناسی این محدوده به تفکیک جنس مواد تشکیل دهنده آن و استفاده از جدول ۱ در محیط نرم‌افزار ArcGIS ۱۰/۵ رتبه‌بندی گردید.

هدایت هیدرولیکی (C): به قابلیت مواد تشکیل دهنده آبخوان جهت انتقال آب، هدایت هیدرولیکی می‌گویند که به نوبه خود، شدت جریان آب زیرزمینی تحت گرادیان هیدرولیکی معین را کنترل می‌کند. هدایت هیدرولیکی با مقدار فضاهای خالی و اتصال بین آنها در آبخوان کنترل می‌شود که حاصل تخلخل بین دانه‌ای، ایجاد درز و شکاف و بستر می‌باشد (۲۳). جهت تهیه این پارامتر، ابتدا لایه ضخامت آبخوان بر اساس نتایج مطالعات ژئوفیزیک و لوگ چاه‌های اکتشافی که تا سنگ کف حفره شده‌اند، تهیه گردید. نقشه قابلیت انتقال آبخوان نیز از شرکت آب منطقه‌ای لردگان تهیه و وارد محیط GIS شد. با تقسیم نمودن نقشه قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت آبخوان و ارزش‌گذاری آن طبق روش تراستیک، نقشه نهایی هدایت هیدرولیکی تهیه شد.

کاربری اراضی: در این شاخص، پارامتر کاربری اراضی به صورت پارامتر هشتم مدل DRASTIC به کار می‌رود. در این مطالعه به دلیل اهمیت نقش کاربری اراضی و نوع کشت در میزان آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی، از نقشه کاربری اراضی که از تصویر ماهواره‌ای لندست TM تهیه می‌شود، استفاده شد و مانند دیگر پارامترها، وزن و رتبه خاصی می‌گیرد. در نهایت فاکتور وزنی پارامتر کاربری اراضی و رتبه مربوطه در یکدیگر ضرب شده و به شاخص DRASTIC اضافه می‌شود. شاخص CD (I) مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\text{DRASTIC} + L(I) = \text{CD} (I) \quad (3)$$

L: پارامتر کاربری اراضی، CD (I): شاخص تراستیک اصلاح شده مراحل تهیه نقشه‌ها را می‌توان به‌طور خلاصه در گام‌های زیر خلاصه کرد. در ابتدا به‌منظور وارد نمودن آمار و اطلاعات موجود

دشت لردگان بر اساس لوگ حفاری چاه‌های مشاهده‌ای، بهره‌برداری و اکتشافی و گزارش‌ها و اطلاعات موجود صورت گرفت. بر اساس لوگ حفاری چاه‌ها، آبخوان دشت لردگان از نوع آزاد است. ارزش گذاری نوع آبخوان در این مدل از صفر تا ۱ است.

چینه‌ها یا لایه‌های منطقه غیراشباع (O): این مشخصه، ظرفیت میرایی آلاینده‌ها را تعیین می‌کند. مشخصات لایه غیراشباع با استفاده از اطلاعات چاه‌های اکتشافی و یا سایر چاه‌های حفر شده در محدوده مورد مطالعه به دست آمد. مشخصات لایه غیراشباع همانند روش DRASTIC می‌باشد، با این تفاوت که ارزش رده‌های آن در روش GODS از صفر تا ۱ متغیر است. برای تولید لایه مربوط به منطقه غیراشباع، از راهنمای لوگ چاه‌های موجود در منطقه استفاده شد؛ بدین صورت که بر حسب نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر چاه، رتبه‌هایی به هر نقطه اختصاص داده و سپس نقشه نرخ‌بندی شده محیط غیراشباع به فرمت رستری تهیه شد.

عمق آب زیرزمینی (D): نحوه تهیه نقشه مربوط به این مشخصه، همانند روش DRASTIC است، ولی محدوده و ارزش گذاری رده‌ها در روش GODS متفاوت است. برای ایجاد این لایه برای آبخوان لردگان از میانگین‌گیری یک دوره ۱۰ ساله استفاده شد و با توجه به ارزش گذاری روش GODS رتبه‌بندی شد.

نوع خاک (S): نحوه تهیه مشخصه نوع خاک همانند روش DRASTIC است، ولی محدوده و ارزش گذاری رده‌ها در روش GODS متفاوت است. از حاصل ضرب مشخصه‌های ذکر شده مربوط به روش GODS، همانگونه که در رابطه ۴ ذکر شده است، نقشه‌ای حاصل خواهد شد که ارزش عددی سلول‌های آن از صفر تا ۱ متغیر است. با کلاس بندی آن به ۵ گروه چشم پوشی (۰/۱-۰)، آسیب پذیری کم (۰/۳-۰/۱)، متوسط (۰/۵-۰/۳)، زیاد (۰/۷-۰/۵) و خیلی زیاد (۱-۰/۷)، نقشه آسیب پذیری آبخوان تهیه می‌شود. پس از تهیه نقشه‌های نوع آبخوان، چینه‌ها یا لایه‌های منطقه غیراشباع، عمق آب زیرزمینی و نوع خاک منطقه بر اساس روش GODS در محیط GIS با استفاده از ماشین حساب رستری، لایه‌ها در یکدیگر ضرب و نقشه نهایی مربوط به پهنه‌های آسیب پذیری استخراج شد.

به محیط نرم‌افزارهای GIS و همچنین پردازش داده‌های اولیه، اقدام به تهیه پایگاه اطلاعاتی در محیط اکسل می‌شود، سپس تمام داده‌ها وارد محیط نرم‌افزار ArcGIS ۱۰/۵ می‌شوند تا با استفاده از روش‌های IDW و کریجینگ برای هر لایه کنترل ترسیم گردد. در ادامه هر لایه با استفاده از تحلیل گر مکانی به نقشه رستری تبدیل شد تا هر سلول دارای ارزش شود. در مرحله بعد نقشه‌های رستری تهیه شده برای هر لایه با کمک همین برنامه بر اساس استانداردهای روش دراستیک کلاسه‌بندی و ارزش گذاری شدند. با استفاده از تحلیل گر مکانی، هر لایه در وزن تعیین شده ضرب گردید و در نهایت برای به دست آوردن شاخص نهایی دراستیک، لایه‌های هشت گانه تهیه شده مطابق رابطه ۳ در محیط GIS با یکدیگر جمع شدند. 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 به صورت نقشه‌ای رستری نمایان می‌شوند که تمام سلول‌های آن دارای ارزش هستند و پتانسیل آلودگی را در نواحی مختلف نقشه به صورت طیف رنگی نشان می‌دهند.

آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت در واقع اثر توزیع متغیرها و پارامترهای ورودی را بر روی نتایج خروجی مشخص می‌کند. میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترهای به کار برده شده جهت ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت لردگان با استفاده از تحلیل حساسیت حذف پارامتر (نقشه) مورد ارزیابی قرار گرفت.

شاخص GODS

این روش از روش‌های تجربی و سریع محاسبه آسیب پذیری سفره از نظر کیفی می‌باشد. سه پارامتر اصلی این روش شامل: پیدایش آب زیرزمینی (از نظر نوع سفره آزاد و تحت فشار)، سنگ‌شناسی آبخوان (از نظر نوع تشکیلات، آبرفتی یا آهکی و یا آذرین و زیرمجموعه آن‌ها) و عمق سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

نوع آبخوان (G): اطلاعات مربوط به نوع آبخوان با استفاده از اطلاعات نقشه منابع آب حاصل می‌شود. تعیین حدود گسترش و نوع آبخوان

تلفیق نقشه‌ها و تهیه نقشه آسیب‌پذیری نهایی GODS

ساختمان و چهارچوب این روش، بسیار ساده و عملی است و سیستمی تجربی جهت ارزیابی سریع آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به آلودگی می‌باشد. در این روش ارزش کلاس‌های مختلف مشخصه‌ها از صفر تا ۱ تغییر می‌کند و به تمامی مشخصه‌ها وزن یکسانی اختصاص داده می‌شود. شاخص آسیب‌پذیری GODS از حاصل ضرب ۴ مشخصه به دست آمد.

یافته‌ها

تحلیل لایه‌های تولید شده مدل دراستیک

پارامتر عمق تا سطح ایستابی (D): بر اساس نقشه پهنه‌بندی شده عمق سطح ایستابی آبخوان دشت لردگان، عمق سفره آب زیرزمینی تقریباً در تمامی محدوده‌های دشت لردگان در عمق بیش از ۱۰ متر قرار دارد. در قسمت‌های کوچکی از غرب و شمال دشت، عمق برخورد به آب زیرزمینی کمتر از ۱۰ متر گزارش شده است که از اهمیت بالایی برخوردار نیست. از سمت شمال و جنوب به مرکز دشت به تدریج عمق سطح ایستابی افزایش پیدا کرده است؛ بدین ترتیب نواحی مرکزی (با عمق بیش از ۳۰/۴ متر) در رتبه‌بندی دراستیک عدد ۱ را به خود اختصاص می‌دهند و در دیگر مناطق دشت با توجه به عمق سطح آب زیرزمینی رتبه‌های ۷، ۵، ۳ و ۲ را به خود اختصاص می‌دهند.

پارامتر محیط خاک (S): مطابق با نقشه تهیه شده برای پارامتر محیط خاک، رتبه‌بندی محیط خاک در دشت لردگان بین اعداد ۳ و ۴ متغیر است. اکثر اراضی مربوط مرکز دشت که شامل لوم رس دار است، در رتبه‌بندی روش دراستیک دارای ارزش ۳ می‌باشند و در قسمت‌هایی از شمال شرق دشت، محیط خاک به صورت لوم رس دار و دارای رتبه ۳ می‌باشد.

پارامتر توپوگرافی (T): بر اساس نقشه توپوگرافی به دست آمده، شیب سطح زمین در دشت لردگان بین ۰ درصد تا ۳۳ درصد متغیر است. اکثر مناطق مرکزی دشت دارای شیب کمتر از ۲٪ و رتبه دراستیکی ۴ می‌باشند. در قسمت‌های شمال و جنوب دشت،

شیب افزایش پیدا کرده و در محدوده ۲ درصد تا ۴ درصد و رتبه دراستیک ۹ قرار دارد. در مجموع دشت لردگان دارای شیب کم و نسبتاً یکنواختی می‌باشد.

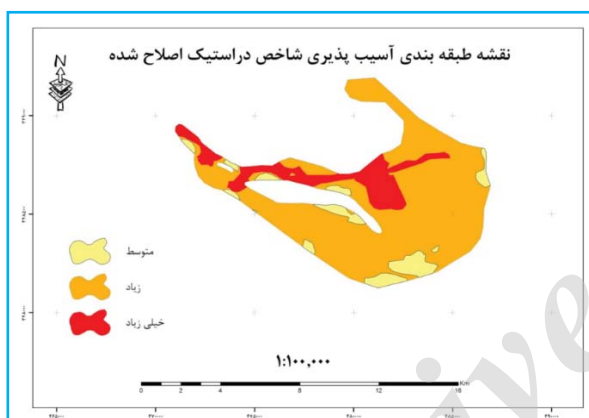
پارامتر تغذیه خالص (R): رتبه‌بندی پارامتر تغذیه خالص آبخوان دشت لردگان بر اساس روش دراستیک اصلاح شده در شکل ۲ نشان داده شده است که بر اساس آن، تغذیه خالص از حواشی به مرکز به تدریج افزایش می‌یابد. در اکثر محدوده دشت، رتبه‌بندی در حداکثر قرار دارد که دلیل عمده آن، جنس خاک نسبتاً متوسط و نفوذپذیری بیشتر و شیب کمتر می‌باشد. در نواحی حاشیه و در مناطق با شیب بالا، تغذیه خالص رتبه‌های کمتر را به خود اختصاص داده که دلیل آن نیز شیب بالاتر می‌باشد. کمترین میزان تغذیه خالص در ناحیه شرقی و بخش کوچکی می‌باشد که دلیل اصلی آن، جنس خاک سنگین، بارندگی نسبتاً کمتر و شیب بالا می‌باشد.

پارامتر محیط آبخوان (A): ضرایب محیط آبخوان دشت لردگان بین ۶ و ۸ متغیر می‌باشد. همانطور که مشخص است، در بخش وسیعی از مرکز دشت، جنس محیط آبخوان متشکل از شن، ماسه و سیلت بوده (مخروط افکنه و تراس‌های آبرفتی) و دارای رتبه دراستیک ۸ می‌باشد. در حاشیه‌های شمال و غرب دشت، جنس محیط آبخوان به صورت ماسه‌سنگ لایه‌لایه با کنگلومرا بوده و رتبه ۶ را به خود اختصاص داده است.

اثر منطقه غیر اشباع (I): بر اساس رتبه‌بندی دراستیک، مناطق غیراشباع دشت لردگان رتبه‌هایی بین ۲ تا ۸ را به خود اختصاص می‌دهند. مطابق شکل ۷، ناحیه‌های متشکل از مخروط افکنه‌ها، پهنه‌های رسی و سنگ آهک دارای رتبه ۳ بوده که عمده مناطق دشت را شامل شده‌اند و در مناطق مرکزی دشت قرار گرفته‌اند، اما در نوار ساحلی رودخانه و منطقه غرب دشت به علت داشتن شن و ماسه با مقدار زیاد، این رتبه افزایش می‌یابد و در نواحی ساحلی به ۸ و در نواحی غربی به علت داشتن ماسه‌سنگ به ۶ می‌رسد.

هدایت هیدرولیکی (C): بر اساس رتبه‌بندی دراستیک هدایت هیدرولیکی، دشت لردگان رتبه‌هایی بین ۴ تا ۸ را به خود اختصاص

متغیر است. بر اساس طبقه بندی آلر و همکاران، این نقشه به سه دسته متوسط، زیاد و خیلی زیاد از نظر پتانسیل آسیب پذیری طبقه بندی می شود؛ بدین ترتیب که ۱۴٪ از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل آسیب پذیری متوسط، ۷۶٪ از مساحت دشت دارای پتانسیل آسیب پذیری زیاد و ۱۰٪ خیلی زیاد می باشد. نقشه آسیب پذیری آبخوان نشان می دهد (شکل ۲) که قسمت های مرکزی دشت لرگان دارای پتانسیل آلودگی بالایی هستند و با پیش روی به سمت شمال، جنوب، غرب و شرق دشت، پتانسیل آلودگی کم تر می شود.



شکل ۲. نقشه پهنه بندی آسیب پذیری دشت لرگان به روش دراستیک اصلاح شده

آنالیز حساسیت مدل

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر (نقشه) در جدول ۲ آورده شده است. مطابق با این جدول، مهم ترین پارامتر تأثیرگذار بر شاخص آسیب پذیری، تأثیر تغذیه است که با میانگین ۵۲/۳۷ اختلاف، دارای بالاترین ضریب حساسیت می باشد. این امر می تواند به وزن بالای نظری این پارامتر نیز ارتباط داشته باشد. پارامتر هدایت هیدرولیکی با میانگین ۴۴/۹ در رده دوم قرار دارد که اهمیت این پارامتر را در تعیین آسیب پذیری آب های زیرزمینی نشان می دهد. بعد از آن عمق آب با میانگین ۴۲، بیشترین تأثیر را بر شاخص آسیب پذیری دارد و سایر پارامترها از نظر تغییر شاخص آسیب پذیری در رده های بعدی قرار دارند.

می دهند. بر اساس نقشه به دست آمده، مناطق غربی دشت دارای کمترین هدایت هیدرولیکی و کمتر از ۷/۲۸ متر بر روز و دارای رتبه دراستیک ۴ می باشد. رفته رفته به سمت غرب دشت میزان هدایت هیدرولیکی افزایش یافته و رتبه دراستیک افزایش پیدا می کند؛ به طوری که بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی در مناطق مرکزی دشت بوده و حائز رتبه دراستیکی ۱۰ می باشد.

کاربری اراضی (L): بر اساس نقشه کاربری اراضی تهیه شده، دشت لرگان دارای رتبه دراستیک کاربری اراضی بین ۲ تا ۸ می باشد. در این دشت کاربری های کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، زمین های بایر و مناطق شهری مشاهده می شود.

وزن دهی

یکی از مراحل مهم پیش از تلفیق نقشه های معیار، تعیین اهمیت نسبی هر یک از پارامترها و اختصاص وزن به هر کدام از آنها می باشد، زیرا هر کدام از نمایه ها تأثیر متفاوتی بر آسیب پذیری دارند. در این تحقیق از وزن های پیشنهاد شده توسط آلر و همکاران استفاده شد (۲۴) که به مهم ترین فاکتور وزن ۵ و به کم اهمیت ترین فاکتور، وزن ۱ اختصاص می یابد.

تهیه نقشه آسیب پذیری آب زیرزمینی با استفاده از مدل دراستیک اصلاح شده

نقشه آسیب پذیری آبخوان دشت لرگان به روش دراستیک اصلاح شده، با به کار بردن محدوده ها و ضرایب وزنی ۸ پارامتر مورد استفاده در این مدل ترسیم گردید. با توجه به شکل، مشخص می شود که محدوده آبخوان دشت لرگان در رتبه بندی دراستیک در محدوده آسیب پذیری متوسط و زیاد قرار دارد؛ به طوری که نواحی حاشیه ای و مرزی دشت در وضعیت آسیب پذیری متوسط قرار دارند و قسمت های زیادی از مرکز دشت وضعیت بدتری نسبت به نقاط دیگر داشته و در وضعیت آسیب پذیری زیاد قرار دارند. نقشه نهایی آسیب پذیری بعد از اجرای مدل دراستیک اصلاح شده در محیط نرم افزار GIS با ترکیب ۸ لایه تهیه شد. نتایج به دست آمده از مدل دراستیک اصلاح شده، نشان می دهد که شاخص دراستیک در آبخوان دشت لرگان بین ۱۰۷ تا ۲۲۴

اراضی در دشت لردگان و همچنین ضریب وزن اعمال شده، این پارامتر از حساسیت کمتری نسبت به سایر پارامترها برخوردار است و به نظر می‌رسد در مورد وزن این پارامتر بایستی تغییر نظر داد.

بر اساس نتایج فوق می‌توان به این نکته پی برد که وزن‌های تعیین شده برای هر یک از پارامترهای موجود در مدل دراستیک، قابل قبول بوده و از صحت خوبی برخوردارند. همچنین بر اساس نتایج مشخص شد که به دلیل یکسان بودن تقریبی کاربری

جدول ۲. نتایج آنالیز حساسیت مدل دراستیک اصلاح شده دشت لردگان

شاخص تغییرات آسیب‌پذیری	پارامتر حذف شده						
	عمق آب	محیط آبخوان	تغذیه	خاک	توپوگرافی	محیط غیراشباع	هدایت هیدرولیکی
میانگین	۴۲/۰۶	۴۱/۶۶	۵۲/۳۷	۲۴/۷	۲۵/۶۸	۳۹/۶۵	۴۴/۹۹
حداقل	-۳۳	۲۶	۲۰	۸	۹	۸	۲۰
حداکثر	۱۰۲	۵۶	۷۲	۴۰	۴۲	۷۲	۶۲
رتبه حساسیت	۳	۴	۱	۷	۶	۵	۲
وزن دراستیک اصلاح‌شده	۵	۳	۴	۲	۱	۵	۳

از منطقه مورد مطالعه را تحت پوشش قرار می‌دهد و مابقی در کلاس ۰/۹ در شمال و غرب حوزه قرار دارند که عمق‌های زیر ۵ متر در فصل پربابی می‌باشند.

نقشه نوع خاک (S)

خاک منطقه مورد مطالعه در دو کلاس (۰/۵، ۰/۶) ارزش‌گذاری شد. کمترین میزان رسوبات موجود در منطقه مورد مطالعه، سیلت لوم است که ۶٪ از منطقه را دربرمی‌گیرد که ۰/۶ ارزش‌گذاری شده است. بیشترین رسوبات موجود در منطقه نیز شامل کلی لوم است که اکثر منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود.

نقشه آسیب‌پذیری نهایی مدل GODS

شاخص نهایی GODS دشت لردگان با استفاده از هم‌پوشانی چهار لایه مدل GODS تهیه شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که شاخص آسیب‌پذیری در محدوده مورد مطالعه، بین ۰/۲۸ تا ۰/۴۰ می‌باشد که در دو کلاس به صورت آسیب‌پذیری کم و متوسط طبقه‌بندی می‌شود. به عبارتی ۳/۴۵٪ از منطقه در محدوده آسیب‌پذیری کم (کلاس ۱) و مابقی در محدوده آسیب‌پذیری متوسط (کلاس ۲) قرار می‌گیرد. نقشه آسیب‌پذیری شاخص نهایی GODS آبخوان دشت لردگان در شکل ۳ ارائه شده است.

لایه‌های تولید شده مدل GODS

نقشه نوع آبخوان (G)

نوع آبخوان منطقه مورد مطالعه از نوع آزاد است و ۱۰۰٪ مساحت منطقه مورد نظر را تحت پوشش قرار می‌دهد و دارای ارزش ۱ است.

نقشه منطقه غیراشباع (O)

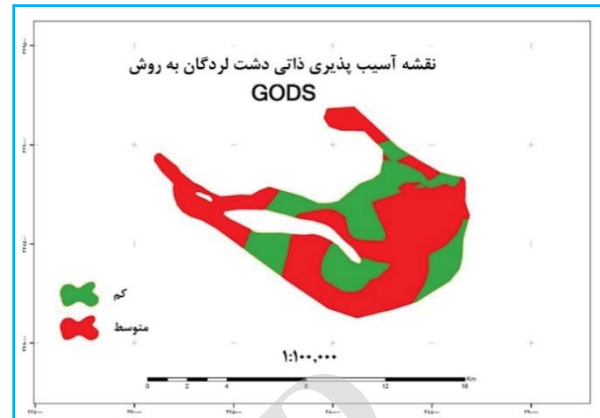
قسمت اعظمی از ناحیه غیراشباع (شمال، شرق، جنوب، مرکز و غرب) دشت لردگان دارای رتبه ۰/۸ می‌باشد که ۸۱/۷٪ از کل مساحت منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. نوار باریکی از شرق تا غرب دارای رتبه ۰/۷ (آبرفت بستر آبراهه) می‌باشد که ۹٪ از مساحت منطقه را در برمی‌گیرد. قسمت محدودی از منطقه به علت وجود سازندهای آهکی دارای رتبه ۰/۹ می‌باشد.

نقشه عمق سطح ایستابی (D)

این لایه در آبخوان لردگان در ۳ کلاس (۰/۹، ۰/۸، ۰/۷) قرار می‌گیرد. در کلاس ۰/۷، عمق آب زیرزمینی ۲۰-۵۰ متر برآورد شده است که ۳۰٪ از منطقه را دربرمی‌گیرد. در کلاس ۰/۸، عمق آب زیرزمینی بین ۵-۲۰ متر سنجیده شده که ۵۳٪

و واحدهای صنعتی در آن است. یکی از بهترین سیستم‌هایی که دسترسی به اطلاعات زیاد، متنوع و تجزیه و تحلیل آن‌ها را آسان‌تر و سریع‌تر می‌نماید و مدیران را جهت تصمیم‌گیری بهینه کمک می‌کند، فناوری سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشد. در نتیجه با استفاده از GIS می‌توان حجم زیاد اطلاعات را جهت ارزیابی آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی سازماندهی کرد و با سهولت و سرعت بیشتر تجزیه و تحلیل داده‌ها، به نتیجه مطلوب دست یافت. نتایج به دست آمده از مدل دراستیک اصلاح شده نشان داد که شاخص پتانسیل آسیب پذیری در این دشت بین اعداد ۱۰۷ تا ۲۲۴ متغیر است. بر اساس مفهوم به دست آمده در پهنه‌بندی توسط شاخص دراستیک اصلاح شده، این دشت به سه دسته با آسیب پذیری متوسط و زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی شد که با توجه به آن، ۱۴٪ از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل آسیب پذیری متوسط، ۷۶٪ از مساحت دشت دارای پتانسیل آسیب پذیری زیاد و ۸٪ خیلی زیاد می‌باشد.

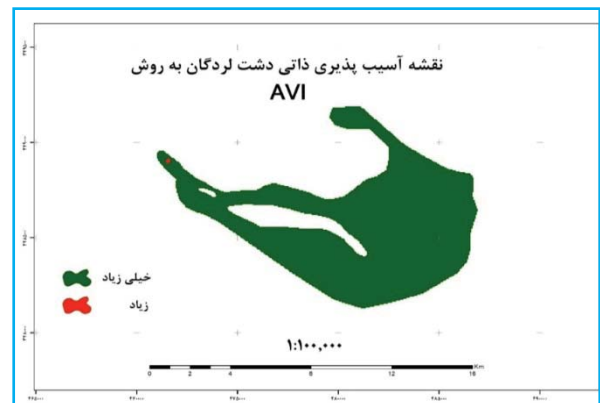
قسمت‌های مرکزی آبخوان دشت لردگان از بیشترین پتانسیل آلودگی در کل منطقه مورد مطالعه برخوردار هستند، به همین سبب کنترل این ناحیه در مقابل آلودگی باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین جهت پیشگیری از ورود این محدوده به دسته پتانسیل آلودگی "خیلی زیاد"، باید مراقبت و کنترل بیشتری صورت پذیرد. می‌توان به این نکته اشاره کرد که اکثر مناطق دشت از نظر پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی در طبقه متوسط قرار دارند که در خطر پیشروی به سمت آسیب پذیری و آلودگی زیاد و حالت بحرانی می‌باشد که مستلزم مراقبت‌ها و پیشگیری‌های بیشتر جهت جلوگیری از آلوده‌تر شدن منطقه می‌باشد. آنالیز حساسیت انجام شده در این تحقیق که اساس ارزیابی نقشه‌های آسیب پذیری می‌باشد، کمک می‌کند تا نتایج جبری به دست آمده ارزیابی و صحت‌سنجی شوند. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای تغذیه خالص (R)، هدایت هیدرولیکی (C)، عمق تا سطح ایستابی (D)، محیط آبخوان (A)، تأثیر منطقه غیراشباع (I)، توپوگرافی (T)، محیط خاک (S) و کاربری



شکل ۳. نقشه آسیب‌پذیری ذاتی به روش GODS

مدل AVI

در این روش فقط بر اساس ضخامت هر یک از واحدهای رسوبی و ضریب هدایتی هیدرولیکی، شاخص آسیب پذیری سفره تعیین می‌شود. بر اساس شکل ۴، به جز منطقه کوچک در غرب دشت، مابقی در طبقه آسیب پذیری بالا قرار دارند.



شکل ۴. نقشه آسیب‌پذیری ذاتی دشت لردگان به روش AVI

بحث

در این مطالعه از بین شاخص‌های مختلف ارزیابی آسیب پذیری آبهای زیرزمینی، شاخص دراستیک اصلاح شده، GODS و AVI جهت بررسی و تعیین آسیب پذیری ذاتی آب زیرزمینی آبخوان دشت لردگان در محیط نرم‌افزاری GIS استفاده شدند. علت انتخاب دشت لردگان، توسعه مناطق شهری و رونق فعالیت‌های کشاورزی

دارد. اگرچه این نکته، دلیلی بر رد یا قبول سایر مدل‌ها نمی‌باشد؛ چرا که بسیاری از مدل‌ها با پارامترهای کمتر می‌توانند در سطوح و مقیاس‌های بزرگ‌تر با تعداد پارامتر کمتر نتایج قابل قبولی ارائه دهند. آنچه که از نتایج این مطالعه برمی‌آید این است که مدل دراستیک اصلاح شده از صحت قابل قبول‌تری برخوردار است. اگرچه پارامتر کاربری اراضی در آنالیز حساسیت در این مطالعه به عنوان آخرین پارامتر شناسایی شد، اما این گونه به نظر می‌رسد که در این مطالعه وزن کمتری برای آن در نظر گرفته شده است. مطالعه حاضر و نتایج آن به جهت اینکه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی را به صورت کامل و بصری نشان می‌دهد، ابزار بسیار ارزشمندی برای مسئولان و متولیان فراهم کرده تا به کمک آن، تصمیمات لازم را در جهت بهبود کاربری اراضی و مدیریت آبخوان دشت لردگان مانند اعمال مدیریت در مصرف آب کشاورزی و کودهای کشاورزی، فاضلاب شهری، تغییر کاربری اراضی و ... اتخاذ کنند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان با کد ۲۳۸۵۰۵۰۸۹۳۲۰۱۲ می‌باشد. بدین وسیله از دفتر مطالعات آب‌های زیرزمینی لردگان به دلیل در اختیار قرار دادن بخشی از داده‌های آب زیرزمینی، تشکر و قدردانی می‌شود.

اراضی (L)، به ترتیب دارای اولویت و اهمیت از نظر تأثیرگذاری بر روی شاخص آسیب‌پذیری هستند که نشان‌دهنده این است که وزن‌های داده شده به پارامترهای مدل دراستیک اصلاح شده از دقت تقریباً مناسبی برخوردار بوده است. یادآور می‌شود که پارامترهای قابلیت هدایت هیدرولیکی آبخوان (C) و محیط آبخوان (A)، از ویژگی‌های ذاتی و زمین‌شناسی منطقه می‌باشند و وزن‌های آنها تغییر زیادی نمی‌کند. بختیاری عنایت و همکاران نیز به توانایی و کامل بودن مدل دراستیک در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان اشاره کردند (۲۶). نتایج مطالعه محمودزاده و همکاران و اصغری مقدم و همکاران نیز بیانگر آن بود که دقت و انعطاف‌پذیری روش دراستیک نسبت به روش‌های دیگر بالاتر است. یافته‌های پژوهش آن‌ها حاکی از آن بود که روش دراستیک دارای قابلیت بالایی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد (۶، ۲۷).

نتایج مطالعه آنورنو در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان رودخانه دنسو در غنا نیز نشان داد که روش DRASTIC روش دقیق‌تری نسبت به روش AVI در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌هاست. روش AVI روش ساده‌تری نسبت به DRASTIC است که برای آبخوان‌های بزرگ‌تر مفیدتر است. نتایج آنها همچنین نشان داد که مدل‌های DRASTIC و AVI، روش‌های کمی مفیدی برای آگاهی رساندن به برنامه‌ریزان، مهندسان، طرفداران محیط زیست و تصمیم‌گیران در مورد پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی هستند (۲۸).

نتیجه‌گیری

با بررسی هر سه مدل استفاده شده در این دشت می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از پارامترهای بیشتر در صحت نتایج تأثیر بسزایی

References

1. Khosravi K, Habibnezhad M, Soleimani K, Babaei K. Assessment of Groundwater Vulnerability Using a-GIS Based DRASTIC Model (Case Study: Dehgolan Plain, Kurdistan Province) JWMR. 2012; 3 (5):42-62. (Persian).
2. Momeni Damaneh, J. Joulaei, F. Alidadi, H. Peiravi, R. Evaluation of Interpolation Methods: to Determine Spatial Variations of Groundwater Qualitative Parameters (Case study: Gonabad Plain). Iranian Journal of Research in Environmental Health. Fall 2015; 1(3): 165-176.
3. Neshat A, Pradhan B, Dadras M. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS, Resources. Conservation and Recycling 2014; 86: 74-86.
4. Rahimzadeh Kivi M, Hamze M, Kardan Moghadam S, Kardan Moghaddam H. Identification of Vulnerability Potential of Groundwater Quality in Birjand Plain using DRASTIC Model and its calibration using AHP. Physical

- Geography Research 2015; 47(3): 481-498. (Persian)
5. Samadi J. Assessment of Kashan Aquifer-Land Use Composite Vulnerability Impact on Groundwater Pollution Using DRASTIC Method and Degradation Model. *Iran-Water Resources Research* 2015; 11(1): 13-21. (Persian)
 6. Asghari Moghadam A, Fijani A, Nadiri A. Groundwater Vulnerability Assessment Using GIS-Based DRASTIC Model in the Bazargan and Poldasht Plains. *Journal of Environmental Studies* 2009; (35): 55-64. (Persian)
 7. Ahmadi j, Akhondi L, Abasi H, Khashei siyki A, Alimadadi M. Determination of aquifer vulnerability using DRASTIC model and a single parameter sensitivity analysis and acts and omissions (Case Study: Salafchegan-Neyzar Plain. *J. of Water and Soil Conservation* 2013; 2(3): 1-25. (Persian)
 8. Entezari AR, Akbari A, Mivaneh F. Investigating the quality of drinking water extracted from groundwater resources on human diseases of the last decade in Mashhad Plain. *Researches in Geographical Sciences* 2013; 13(31): 157-173. (Persian)
 9. Hamza SM, Ahsan A, Imteaz MA, Rahman A, Mohammad TA, Ghazali AH. Accomplishment and subjectivity of GIS-based DRASTIC groundwater vulnerability assessment method: a review. *Environ Earth Sci* 2015; 7(73): 3063-3076.
 10. Voudouris K, Publications E, Kazakis N, Polemio M, Kareklas K. Assessment of Intrinsic Vulnerability using the DRASTIC Model and GIS in the Kiti Aquifer, Cyprus. *European water* 2010; 30: 13-24.
 11. Kholghi M, Taki R. Evaluating Groundwater vulnerability in Ghazvin Plain. *Journal of Engineering Geology* 2003; (3): 255-270. (Persian)
 12. Haghizadeh A, Artimani M., Tahmasebipour N. Tahlil Potansiyel Yabi Analysis of Groundwater Potential Vulnerability Using GIS Based DRASTIC-LU Model (Case Study: Ghahavand-Razan, Hamadan Province). *Journal of Environmental Science and Technology (JEST)* 2016; 1-17. (Persian)
 13. Khemiri S, Khnissi A, Alaya MB, Saidi S, Zargouni F. Using GIS for the comparison of intrinsic parametric Methods: assessment of groundwater vulnerability to pollution in scenarios of semi-arid climate: the case of Foussana groundwater in the central of Tunisia. *Journal of Water Resource and Protection* 2013; 8(5): 835-845.
 14. Ahmadi A, Abromand M. Vulnerability of Khash-Plain Aquifer, Eastern Iran, to Pollution Using Geographic Information System (GIS). *applied geology* 2009; 5(1): 1-11. (Persian)
 15. Makhdom AF, Darvishsefat AA, Jafarzadeh HH. Environmental valuation and Planning by Geographic Information System. *Tehran Univ. Press*; 2002. P.304.
 16. Lasagna M, Domenico D, Franchino E. Intrinsic groundwater vulnerability assessment: issues, comparison of different methodologies and correlation with nitrate concentrations in NW Italy. *Environmental Earth Sciences* 2018; 77: 277-293.
 17. Ahmed I, Nazzal Y. Hydrogeological vulnerability and pollution risk mapping of the Saq and overlying aquifers using the DRASTIC model and GIS techniques, NW Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences* 2015; 64: 342-356.
 18. Zhao, Y. & Sacco, D. 2015. Assessment of Groundwater Risk of Agrochemicals Based on a Modified DRASTIC Method. *Engineering Geology for Society and Territory*. 3: 291-294.
 19. Van Stempvoort D, Ewert L, Wassenaar, L. Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal* 1993; 18(1): 25-37.
 20. Chitsazan M, Akhtari Y. A GIS-based DRASTIC Model for assessing Aquifer Vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran. *Water Resource Management* 2008; 6(23): 1137-1155.
 21. Piscopo G, Pleasure P. Groundwater vulnerability map explanatory notes. Lachlan Catchment. Centre of Natural Resources. New South Wales (NSW) Department of Land and water Conservation; 2001. P. 14.
 22. Mohammadi K, Niknam R, Majd VJ. Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: a case study in Tehran-Karaj aquifer, Iran. *Environmental Geology* 2008; 2(58): 437-446.
 23. Plymale CL, Angle MP. Groundwater Pollution Potential of Fulton County, Ohio. Ohio Department of Natural Resources Division of Water, Water Resources Section. *Groundwater Pollution Potential. Report* 2002; (45).
 24. Aller L, Bennett T, Lehr JH, Petty RJ, Hacket G. DRASTIC: Astandarized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting. *US Environmental protection Agency. Rep EPA* 1987; 2-87.
 25. Chilton PJ, Vlugman AA, Foster SSD. A ground-water pollution risk assessment for public water supply sources in Barbados. In: *Proceedings of the International Symposium on Tropical Hydrology and Caribbean Water Resources*, San Juan, Puerto Rico 1990; 279-289.
 26. Bakhtiyari Enayat B, Malekian A, Salajegh A. Assessment of groundwater vulnerability using Modified DRASTIC, Logistic Regression and AHP-DRASTIC (Hashtgerd plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 2016; 47(2): 269-279. (Persian)
 27. Mahmoudzadeh A, Rezaeian S, Ahmadi A. Assessment of Meymeh Plain Aquifer Vulnerability in Esfahan Using Comparative Method AVI, GODS, DRASTIC. *Journal of Environmental Studies* 2013; 39(2): 45-60. (Persian)
 28. Anornu GK. Evaluation of AVI and DRASTIC Methods: for Groundwater Vulnerability Mapping. *Journal of Environment and Ecology* 2013; 4(2): 126-135.