Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Pollution vulnerability assessment of groundwater in Sirjan plain using DRASTIC and GIS

Ahmad Abbasnejad[1]*, Hesam Ahmadi Afzadi[2], Behnam Abbasnejad[3]

[1] Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
[2] Graduated M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
[3] Postdoc Researcher, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

Introduction

Groundwater is one of the most important water resources in many parts of Iran as well as in Sirjan plain. Although in comparison with surface waters, groundwaters are less vulnerable to pollution, their pollution abatement is much more difficult. It is thus necessary to protect them from being polluted. Additionally, in contrast with stream waters which are concentrated in linear areas across the world, groundwaters are present in vast areas. This means they are much more accessible and human beings are much more dependent on them. They are also present under terrains having different uses. That is, their protection against pollution and preparing their vulnerability maps is of utmost importance. There are different methods to determine the pollution potential of groundwater, the most widely used and the most comprehensive method is DRASTIC. DRASTIC is a model that considers the main hydrological and geological factors which potentially may impact aquifers. It considers seven relevant parameters which include depth to water table (D), recharge rate (R), aquifer material (A), soil characteristics (S), topographic slope (T), vadose zone impact (I), and aquifer's hydraulic conductivity (C). The depth to the water table (D, in meters) is the distance from the land surface to the groundwater level, which means the distance the polluter must pass to reach groundwater. The net recharge (R, in mm per year) is the amount of infiltrated water that reaches the aquifer from the surface. The soil characteristics determine the ease with which a polluter can pass the soil layer toward groundwater. The probability of a surficial polluting agent reaching groundwater is inversely related to surface slope, which is expressed as T in DRASTIC. The material comprising the vadose zone plays an important role in blocking the movement of polluting agents to reach the water table. In DRASTIC, each parameter has devoted a rate of 1 (the least important) to 10 (the most important) which depends on its value. Subsequently, the DRASTIC index is determined using the weights considered for each of the seven parameters. Sirjan plain is one of the most developing plains in Iran which has many different land uses, including agriculture, urban areas, roads, and factories. The majority of these uses may pollute groundwater. It is, therefore, necessary to adapt the different land uses with groundwater vulnerability rates. So, the purpose of this article is to determine the groundwater pollution potential of this plain using the DRASTIC model.

Materials and Methods

In this study, the relevant seven parameters were first prepared. For preparing the D layer, the depths of the water table measured from monitoring wells across the plain were employed. The (R) layer was prepared using the data of rainfall infiltration, runoff infiltration, and infiltration from residential and agricultural areas. For preparing the (A) layer, 70 geological logs of the area were used. The (S) layer was prepared according to field studies and geological logs. The digital elevation model (DEM) was used to prepare the (T) layer. The (I) layer was prepared using the geological logs of the area. Finally, the (C) layer was prepared by dividing the transmissibility values of the aquifer by its thicknesses. All maps were rated according to and combined to calculate the DRASTIC index (DI). DI values were validated according to nitrate concentrations, and sensitivity analysis was undertaken by omitting the layers successively.

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Results and Discussion

The relevant DRASRIC layers are given in Figures 2 to 8. In the depth rating map (Fig 2), the majority of the surface belongs to rate 1. This means that due to high water-level depths, this parameter has lowered pollution potential. In the recharge rating map (Fig 3), the major part of the plain is green (rate 1), meaning very low levels of recharge and a low role in pollution. The aquifer material map (Fig 4) is mainly covered by 5, 6, and 7 rates. The soil rating map (Fig 5) indicates that the 7, 8, and 9 rates cover the major parts. This means a rather high pollution potential share of this parameter. In the topographic slope rating map (Fig 6) the 9 and 10 rates cover vast surfaces at the west and south, and the 4-7 rate values of the vadose zone rating map (Fig 7) represent the average contribution from this parameter. The aquifer's hydraulic conductivity map (Fig 8) indicates a rather wide range contribution of this parameter. DI values of the study area range from 60 to 128, representing rather medium vulnerability. The higher vulnerability values are mostly observed in the western part, where recharge from agriculture is high, the topographic slope is gentle, and the water level is rather high. Low and medium values of DI are mostly observed at the north center and east. In a qualified vulnerability map comparatively low, medium, and high vulnerability values are separated. The high values mostly belong to residential and agricultural areas, which are at the risk of nitrate, pesticide, saltwater, detergent, and heavy metal risk factors.

Conclusion

The DRASTIC index values of the Sirjan alluvial aquifer range from 60 to 128, meaning low- to high vulnerability values. The most vulnerable locations mainly include residential and agricultural areas which may deliver considerable amounts of nitrate, detergents, pesticides, heavy metals, and dissolved salts to the aquifer. It is, therefore, necessary to reduce the pollution potential in these areas by such means as reducing pesticide use, using green agricultural practices, and collecting and treating sewage from residential areas. Considering the high water level dropdowns in this plain, which means decreasing groundwater resources, it is necessary to abate the pollution risk of these limited resources via such means as adapting land use with vulnerability at every location.

Keywords: ArcGIS, DRASTIC, Sirjan aquifer, Vulnerability

Article Type: Case Study

*Corresponding Author, E-mail: aabbas@uk.ac.ir

Citation: Abbasnejad, A., Ahmadi Afzadi, H., & Abbasnejad, B. (2023). Pollution vulnerability assessment of groundwater in Sirjan plain using DRASTIC and GIS. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 200-214.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11610.1146
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.13.1

Received: 02 October 2022, Received in revised form: 06 November 2022, Accepted: 09 November 2022, Published online: 09 November 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 200-214
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

ارزیابی استعداد آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت سیرجان با استفاده از شاخص دراستیک در محیط GIS

احمد عباس‌نژاد[۱]*، حسام احمدی افزادی[۲]، بهنام عباس‌نژاد[۳]

[۱] استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

[۲] دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

[۳] پژوهشگر پسا دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

حفاظت از منابع آب زیرزمینی محدود کشور از اهمیت زیادی برخوردار بوده و لازم است آبخوان‌ها از نظر استعداد آلودگی مورد مطالعه قرار گرفته و زون‌های مستعد به آلودگی برای حفاظت بیش‌تر تفکیک شوند. آبخوان آبرفتی دشت سیرجان، واقع در جنوب استان کرمان، در معرض آلودگی‌های ناشی از کشاورزی، مناطق مسکونی و صنعتی است. لذا، هدف این مطالعه تهیهٔ نقشهٔ آسیب‌پذیری آبخوان دشت سیرجان با استفاده از مدل دراستیک است. بدین‌منظور ابتدا هفت لایهٔ اطلاعاتی مورد نیاز در ArcGIS تهیه و مقادیر مربوطه رتبه‌بندی شدند. در مرحلهٔ بعد، بر اساس دستورالعمل این روش، ادغام شدند و نقشهٔ مقادیر شاخص دراستیک آبخوان تهیه شد. در این نقشه، مقادیر شاخص بین ۶۰ تا ۱۲۸ متغیر هستند. با کیفی‌سازی این نقشه، محدوده‌هایی با آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد به‌دست آمدند. حساسیت‌سنجی این مدل با روش تغییرات شاخص آسیب‌پذیری و صحت‌سنجی آن با غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی انجام شد و مورد تأیید قرار گرفت. بر اساس این مطالعه، محدوده‌هایی با آسیب‌پذیری کم، دارای شاخص دراستیک ۶۰ تا ۸۷، در شمال، غرب و مرکز دشت قرار داشته و با سطوح فاقد کاربری انطباق دارند. ولی محدوده‌هایی با آسیب‌پذیری متوسط، دارای شاخص دراستیک ۸۷/۱ تا ۱۰۰، در شمال، جنوب و بخش‌هایی از غرب دشت واقع شده‌اند که معمولاً با سطوح فاقد کاربری انطباق دارند. ولی محدوده‌های با آسیب‌پذیری بالا، دارای شاخص دراستیک ۱۰۰/۱ تا ۱۲۸، به‌طور عمده با سطوح کشاورزی و مناطق مسکونی مطابقت دارند. لذا، توجه به اصلاح روش‌های کشاورزی، مصرف کودهای نیتراتی کم‌تر و تسریع در راه‌اندازی شبکهٔ جمع‌آوری و تصفیهٔ فاضلاب شهر سیرجان مورد تأکید است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، آسیب‌پذیری، دراستیک، سیرجان، ArcGIS

نوع مقاله: مطالعه موردی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: aabbas@uk.ac.ir

استناد: عباس‌نژاد، ا.، احمدی افزادی، ح.، عباس‌نژاد، ب. (۱۴۰۲). ارزیابی استعداد آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت سیرجان با استفاده از شاخص دراستیک در محیط ArcGIS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۲۰۰-۲۱۴.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11610.1146

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.13.1

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۲۰۰ تا ۲۱۴

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

آب زیرزمینی منبع مهم و اصلی آب شرب در بخش‌های زیادی از ایران و از جمله در منطقهٔ سیرجان است. اگر چه آب‌های زیرزمینی در مقایسه با آب‌های سطحی در معرض آلودگی کم‌تری قرار دارند، ولی رفع آلودگی آن‌ها به مراتب مشکل‌تر از آب‌های سطحی است (Fetter et al., 1999). بنابراین، جلوگیری از آلوده شدن آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در عین حال، برخلاف آب‌های شیرین رودخانه‌ها که در محدوده‌های خطی باریکی در سطح زمین جریان دارند، آب‌های زیرزمینی در سطوح وسیعی در زیرزمین قرار دارند. نتیجهٔ چنین وضعیتی این است که اولاً این منبع با حفر چاه یا قنات در سطح وسیعی از مناطق قابل دسترسی است و انسان به آن وابستگی شدیدتری دارد و در ثانی، در زیر بسیاری از سطوحی که دارای کاربری های مختلف هستند، وجود دارد. بنابراین، لازم است بین کاربری زمین و امکان آلودگی آب زیرزمینی هماهنگی ایجاد شود. این اقدام منوط به تهیهٔ نقشه‌های استعداد آلودگی آب زیرزمینی است.

روش‌های مختلفی برای ارزیابی استعداد آلودگی آب زیرزمینی وجود دارد که یکی از پرکاربردترین و جامع‌ترین آن‌ها روش دراستیک است (Barbulescu, 2020). در این روش، هر یک از عوامل مختلفی که در انتقال آلودگی از سطح به عمق تا رسیدن به آب‌های زیرزمینی و انتشار در آن تأثیر دارند در یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش ضرب شده و در نهایت، با هم جمع می‌شوند (Aller et al., 1987). رقم به‌دست آمده، مبین میزان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آن محل نسبت به آلاینده‌های سطحی است (Nakhaei et al., 2013). بنابراین، می‌توان نقشهٔ آسیب‌پذیری را بر اساس این مقادیر تهیه کرد. بدیهی است که این نوع مطالعات که در آن نیاز به ادغام داده‌های مکانی مربوط به نقشه‌های مختلف است به بهترین نحو با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی قابل انجام هستند.

جنبه‌های مهم روش دراستیک شامل دقت (McLay et al., 2001)، کم‌هزینه بودن (Akhavan et al., 2011) و ساده بودن روش تهیهٔ آن (Barbash and Resek, 1997) است. مزیت مهم سیستم اطلاعات جغرافیایی در تهیهٔ مدل دراستیک، کارایی بالای آن در ترکیب لایه‌ها و تغییر پارامترهای مورد استفاده برای رتبه‌بندی استعداد آلودگی است (Wang et al., 2007). به این ترتیب، تمامی هفت پارامتر مورد نیاز برای سنجش استعداد آلودگی در سیستم اطلاعات جغرافیایی و بر اساس دستورالعمل روش دراستیک با هم ادغام می‌شوند.

نمونه‌هایی از مطالعات ارزیابی استعداد آلودگی آب زیرزمینی در ایران با استفاده از مدل دراستیک (یا شکل تغییر یافتهٔ آن) که به‌صورت تنها یا توأم با روش‌های دیگر به‌کار رفته است عبارتند از: دشت خوی (Barzegar et al., 2016)، دشت شبستر (Kadkhodaie et al., 2019)، دشت تبریز (Barzegar et al., 2016)، دشت اردبیل (Gharekhani et al., 2015)، دشت باغین در کرمان (Neshat et al., 2014)، آبخوان‌های زاینده‌رود (Rezaei et al., 2013)، دشت همدان-بهار (Akhavan et al., 2011)، دشت سبزوار (Eshaghi Ilbeygi et al., 2023)، آبخوان ارومیه (Aghazadeh et al., 2022)، دشت عجب‌شیر (Nouri Sangarab et al., 2021)، دشت خنج فیشور لارستان (Ghanbari, 2020)، دشت بستان‌آباد (Asghari Moghadam et al., 2016)، آبخوان خاتون‌آباد (Nakhaei et al., 2013)، دشت‌های بازرگان-پلدشت (Asghari Moghadam et al., 2010) و دشت‌های زویرچری و خران (Chitsazan and Akhtari, 2006).

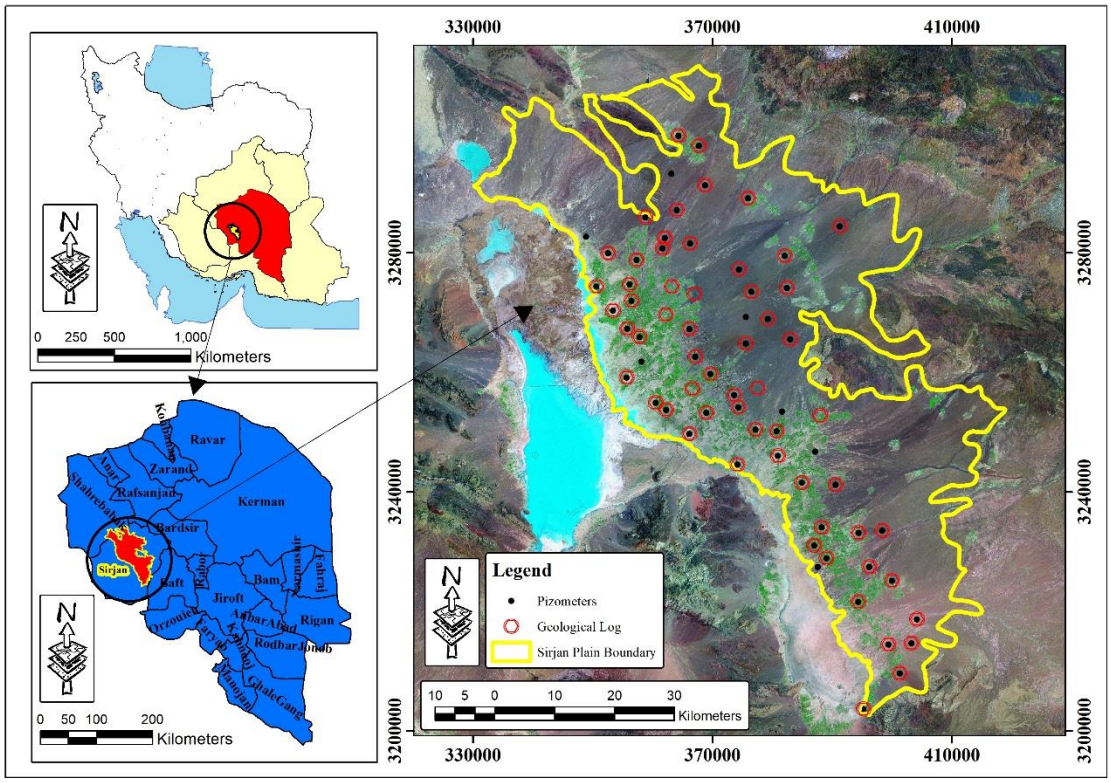
دشت سیرجان یکی از دشت‌های به شدت در حال توسعه در کشور است که کاربری‌های مختلفی، اعم از کشاورزی، شهرسازی، توسعهٔ راه‌ها و احداث کارخانه‌ها در آن در حال انجام است. بسیاری از آن‌ها می‌توانند آب‌های زیرزمینی را آلوده کنند. بنابراین، لازم است کاربری زمین با استعداد آلودگی آب‌های زیرزمینی در آن هماهنگ باشد. یکی از راه‌های شناخته شده و معمول برای سنجش استعداد آلودگی آبخوان‌ها استفاده از مدل دراستیک است تا براساس آن بتوان بین کاربری زمین و استعداد آلودگی هماهنگی برقرار کرد. از این‌رو، هدف این مطالعه تعیین استعداد آلودگی آب‌های زیرزمینی نقاط مختلف این دشت با استفاده از مدل دراستیک است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

دشت سیرجان با وسعت حدود ۳۸۰۰ کیلومتر مربع در جنوب شرقی ایران (جنوب غرب استان کرمان) واقع شده است (شکل ۱). این دشت توسط ریزش‌های جوی کوه‌های مرتفع زون ارومیه-دختر که در شمال و شرق آن قرار دارند تغذیه می‌شود. در آن، جهت کلی حرکت آب زیرزمینی از شرق و شمال شرق به غرب و شمال غرب است. آب‌های سطحی و زیرزمینی در نهایت وارد نمک‌زارهای غرب این دشت می‌شوند. در دشت سیرجان ۱۳۲۲ حلقهٔ چاه و ۵۱ رشته قنات دایر وجود دارد که میزان تخلیهٔ سالانهٔ آن‌ها به‌ترتیب ۴۴۱/۸ و ۴۲ میلیون مترمکعب است. کشاورزی منبع اصلی درآمد و شغل مردم است و سهم پسته به مراتب بیش از سایر محصولات کشاورزی است. مطالعات آب‌های زیرزمینی آن توسط Abbasnejad and Shahidasht (2003)، Mahabghodss Consulting Engineers (2007) و Abkhan Consulting Engineers (2013) صورت گرفته است. به لحاظ زمین‌شناختی، کوه‌های شمال و شرق آن به‌طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن تشکیل شده‌اند. سطح نیمهٔ شرقی دشت توسط آبرفت‌های نسبتاً درشت

مخروط افکنه‌ای پوشیده شده است. اندازهٔ ذرات به سمت غرب کاهش می‌یابد. در محدودهٔ گسترش باغ‌های پسته و تراکم چاه‌های این دشت، رسوبات بیش‌تر رسی، سیلتی و ماسه‌ای هستند که به سمت غرب سهم رس زیاد شده و به‌تدریج درصد بلورهای نمک و گچ در آن افزایش می‌یابد. آن‌ها در نهایت جای خود را به نمکزارهای غرب این دشت می‌دهند. مقدار بارش و دمای متوسط سالانهٔ هوا در این دشت به‌ترتیب حدود ۲۰۰ میلی‌متر و حدود ۱۶ درجهٔ سانتی‌گراد است.



شکل ۱- موقعیت دشت سیرجان (در نقشهٔ دشت، رنگ سبز نشان‌دهندهٔ کاربری کشاورزی، نقطه‌های تیره نشان‌دهندهٔ موقعیت پیزومترها و دوایر قرمز نشان‌دهندهٔ لاگ‌های زمین‌شناسی است)

Figure 1- The location of Sirjan plain (on the map of the plain, the green color indicates agricultural use, dark points indicate the position of piezometers, and red circles indicate geological logs)

۲-۲- مدل سازی دراستیک

برای ارزیابی استعداد آلودگی با استفاده از مدل دراستیک نیاز به هفت پارامتر عمق آب (D)، میزان تغذیه (R)، جنس آبخوان (A)، جنس خاک (S)، شیب توپوگرافی (T)، تأثیر زون غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی آبخوان (C) است (Aller et al., 1987) که در ادامه نحوهٔ تهیهٔ هر یک از پارامترها و مراحل بعدی مطالعه توضیح داده می‌شود.

۲-۲-۱- لایهٔ عمق آب زیرزمینی

هر چه عمق آب زیرزمینی بیش‌تر باشد احتمال رسیدن آلایندهٔ سطحی به آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. بنابراین، عمق آب زیرزمینی یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر استعداد آلودگی است (Ghanbari, 2020). به‌منظور تهیهٔ این لایه، آمار پیزومترهای سطح دشت (شکل ۱)، داده‌های سطح آب در فروردین ۱۳۹۵ (دریافت شده از امور مطالعات سازمان آب منطقه‌ای استان کرمان) مورد استفاده قرار گرفت (شکل۱). درون‌یابی داده‌های سطح آب در محیط ArcGIS با روش Kriging انجام شد. لایهٔ درون‌یابی از نوع رستر بوده و پس از تهیه، بر اساس جدول ۱ رتبه‌بندی شد.

۲-۲-۲- لایهٔ تغذیه

آب نفوذکننده از سطح زمین به سمت عمق همراه با خود آلاینده‌های سطحی را منتقل می‌سازد. بنابراین، استعداد آلوده شدن آبخوان با میزان تغذیه ارتباط مستقیم دارد (Nakhaei et al., 2013). آب نفوذکننده از سطح زمین می‌تواند شامل مواردی نظیر باران، آب برگشتی کشاورزی، فاضلاب و امثال آن باشد (Aller et al., 1987). برای تهیهٔ این لایهٔ اطلاعاتی از نفوذ باران، نفوذ آب‌های جاری در مسیل‌ها، نفوذ فاضلاب مسکونی و نفوذ آب کشاورزی استفاده شد. در گزارش بیلان آب زیرزمینی دشت سیرجان (Abkhan Consulting Engineers, 2013)، مقدار نفوذ از سطوح مختلف دشت برآورد شده و مبنای تهیهٔ این لایه بوده‌اند. در نهایت، نقشهٔ حاصله بر اساس جدول ۲ رتبه‌بندی شد.

۲-۲-۳- لایهٔ جنس آبخوان

مواد مختلف تشکیل‌دهندهٔ آبخوان‌ها از نظر استعداد جذب یا انتقال آلاینده‌ها تفاوت‌های زیادی دارند. از این نظر می‌توان طیفی از انواع سنگ نفوذناپذیر تا به شدت نفوذپذیر را تصور کرد. در یک انتهای طیف استعدادها، لایه‌های رسی-شیلی قرار دارند که هم توان جذب بالائی دارند و هم نفوذپذیری آن‌ها برای انتقال آلاینده‌ها بسیار کم است و در انتهای دیگر طیف، موادی نظیر سنگ آهک کارستی قرار دارند که با داشتن شبکهٔ غارهای مرتبط، آلاینده را به سرعت و در مسافت طولانی پخش می‌کنند. برای تهیهٔ این لایه ابتدا ۷۰ لاگ زمین‌شناسی چاه‌های حفر شده در سطح دشت از منابع مختلف (نظیر Mahabghodss Consulting Engineers (2007) و لاگ زمین‌شناسی موجود در پرونده چاه‌ها در سازمان آب منطقه‌ای کرمان) تهیه شد و سپس مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، تعداد ۶۱ مورد از آن‌ها (شکل ۱) برای تهیهٔ لایهٔ جنس آبخوان مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس جدول ۳ ارزش عددی آن تعیین و لایه مربوطه تهیه شد.

۲-۲-۴- لایهٔ جنس خاک سطحی

آلاینده‌های سطحی قبل از هر چیز باید از خاک عبور کنند. خاک می‌تواند کم و بیش آلاینده را جذب، خنثی یا متوقف کند که تابع بافت، نفوذپذیری و مقدار مواد آلی آن است (Abbasnejad and Shahidasht, 2003). اطلاعات مربوط به این لایه در دشت سیرجان از نقشهٔ خاک‌شناسی استان (Sertaj, 2008) و نیز لاگ‌های زمین‌شناسی چاه‌ها (*Mahabghodss Consulting Engineers*, (2007)) تهیه شدند. ارزش عددی این لایه با استفاده از جدول ۴ تعیین و بر اساس آن لایهٔ مربوطه تهیه شد.

۲-۲-۵- لایهٔ شیب توپوگرافی

در سطوح پرشیب‌تر امکان نفوذ آب، و به تبع آن، نفوذ آلاینده‌های سطحی کم‌تر است. برای تهیهٔ این لایه، ابتدا نقشهٔ مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در محیط ArcGIS تهیه، و سپس با استفاده از جدول ۵ وزن‌دهی شد.

۲-۲-۶- لایهٔ جنس زون غیراشباع

آلاینده بعد از عبور از خاک باید از زون غیراشباع عبور کند تا به سطح آب‌های زیرزمینی بپیوند. بدیهی است که بستگی به جنس این زون، ممکن است آلاینده به مقدار کم تا زیاد جذب و حتی متوقف شود. لازم به ذکر است که ضخامت این زون هم مهم است که تأثیر آن در لایهٔ عمق آب (لایهٔ اول) دیده شده است. جنس زون غیراشباع از لاگ زمین‌شناسی چاه‌های منطقه مشخص شد و با استفاده از جدول ۶ ارزش عددی هر محل به‌دست آمد.

۲-۲-۷- لایهٔ هدایت هیدرولیکی

هرچه هدایت هیدرولیکی آبخوان بیش‌تر باشد آلاینده با سهولت بیش‌تر پخش شده و سفرهٔ آب زیرزمینی را آلوده می‌کند. به‌همین دلیل، این پارامتر در شاخص دراستیک وارد شده است. با توجه به این‌که قابلیت انتقال سفرهٔ آب زیرزمینی (T) برابر است با هدایت هیدرولیکی ضرب در ضخامت آن، می‌توان از تقسیم قابلیت انتقال بر ضخامت آبخوان در هر محل مقدار هدایت هیدرولیکی را برآورد کرد. نقشه‌های قابلیت انتقال و ضخامت لایهٔ آبدار سفرهٔ آب زیرزمینی دشت سیرجان توسط Mahabghodss Consulting Engineers (2007) تهیه شده و بر اساس آن‌ها لایهٔ هدایت هیدرولیکی آبخوان با روش Kriging در محیط ArcGIS تهیه شد. در نهایت، این لایه بر اساس جدول ۷ رتبه‌بندی شد.

۲-۲-۸- تلفیق لایه‌ها و تهیهٔ نقشه آسیب‌پذیری

قبل از تلفیق لایه‌ها، همهٔ آن‌ها به فرمت رستری تبدیل شدند، اندازهٔ پیکسل‌ها (۳۰ متر) و سیستم مختصات آن‌ها یکسان شد. در مرحلهٔ بعد، تلفیق با استفاده از رابطهٔ زیر صورت گرفت:

$$\mathbf{DI} = \mathbf{D_R D_W} + \mathbf{R_R R_W} + \mathbf{A_R A_W} + \mathbf{S_R S_W} + \mathbf{T_R T_W} + \mathbf{I_R I_W} + \mathbf{C_R C_W} \qquad (۱)$$

که در آن DI شاخص دراستیک و حروف D، R، A، S، T، I و C به‌ترتیب لایه‌های عمق آب (متر)، تغذیه (میلی‌متر در سال)، جنس آبخوان، خاک سطحی، شیب توپوگرافی (درصد)، جنس زون غیراشباع و هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) هستند. اندیس w وزن آن لایه و اندیس r رتبه در هر پیکسل از آن لایه است. شاخص دراستیک بر اساس جدول ۸ رتبه‌بندی و نقشهٔ آن تهیه شد. رتبه‌بندی کمی و کیفی شاخص دراستیک در جدول ۹ درج شده است.

جدول ۱- بازه‌ها و رتبه‌های عمق آب زیرزمینی (Aller et al., 1987)

Table 1- Depth to water rating and weighting

بازه (متر)	0-1.5	1.5-4.6	4.6-9.1	9.1-15.2	15.2-22.8	22.8-30.4	>30.4
رتبه	10	9	7	5	3	2	1

جدول ۲- بازه‌ها و رتبه‌های میزان تغذیهٔ خالص در سال (Aller et al., 1987)
Table 2- Net charge rating and weighting

بازه (میلی‌متر)	0-50.8	50.8-101.6	101.6-177.8	177.8-254	254<
رتبه	1	3	7	8	9

جدول ۳- جنس و رتبهٔ محیط آبخوان (Aller et al., 1987)
Table 3- Aquifer media rating and weighting

جنس	شیل ضخیم	آذرین و دگرگونی	آذرین و دگرگونی هوازده و ماسه سنگ نازک لایه	توالی سنگ آهک و شیل	ماسه سنگ ضخیم	سنگ آهک ضخیم	شن و ماسه	بازالت	سنگ آهک کارستی
رتبه	2	3	4	6	6	8	8	9	10

جدول ۴- جنس و رتبهٔ خاک (Aller et al., 1987)
Table 4- Net charge rating and weighting

جنس	رس فاقد شکاف و خاکدانه	خاک ماک (muck)	لوم رسی	لوم سیلتی	لوم	لوم ماسه‌ای	رس دارای شکاف و یا خاکدانه	تورب	ماسه	شن	خاک نازک یا فقدان آن
رتبه	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10

جدول ۵- بازه‌ها و رتبه‌های شیب توپوگرافی (Aller et al., 1987)
Table 5- Topographic slope rating and weighting

بازه (متر)	0-2	2-6	6-12	12-18	18<
رتبه	10	9	5	3	1

جدول ۶- جنس و رتبهٔ زون غیراشباع (Aller et al., 1987)
Table 6- Vadose zone material rating and weighting

جنس	سیلت یا رس	شیل	سنگ آذرین یا دگرگونی	سنگ آهک	ماسه سنگ	لایه‌های شیل، ماسه سنگ و سنگ آهک	ماسه و شن همراه با مقدار زیادی سیلت و رس	ماسه و شن	بازالت	سنگ آهک کارستی
رتبه	1	3	4	6	6	6	6	8	9	10

جدول ۷- بازه‌ها و رتبه‌های هدایت هیدرولیکی (Aller et al., 1987)
Table 7- Aquifer hydraulic conductivity rating and weight

بازه (متر بر روز)	0.04-4.1	4.1-12.3	12.3-28.7	28.7-41	41.82	82<
رتبه	1	2	4	6	8	10

جدول ۸- وزن‌های اختصاص داده شده به پارامترهای مدل دراستیک (Barbulescu, 2020)
Table 8- Weights assigned to DRASTIC model parameters

پارامتر	عمق سطح آب زیرزمینی	تغذیه خالص	جنس آبخوان	جنس خاک	توپوگرافی	جنس زون غیراشباع	هدایت هیدرولیکی آبخوان
وزن	5	4	3	2	1	5	3

جدول ۹- رتبه بندی کمی و کیفی شاخص دراستیک (DI)
Table 9- Quantitive and qualitative rating of DRASTIC index

محدوده شاخص	79>	80-99	100-119	120-139	140-159	160-179	180-199	200<
رتبه کمی	1	2	3	4	5	6	7	8
رتبه کیفی (خطر آلودگی)	بدون خطر	خیلی کم	کم	کم تا متوسط	متوسط تا زیاد	زیاد	خیلی زیاد	کاملاً مستعد

۲-۲-۹- تحلیل حساسیت و صحت‌سنجی

تحلیل حساسیت یک گام اساسی و ضروری در ارزیابی مدل دراستیک است. دو روش برای آن معرفی شده که Nakhaei et al. (2013) به اختصار آن‌ها را معرفی کرده‌اند. در این مطالعه، تحلیل حساسیت از طریق حذف لایه‌های مدل دراستیک انجام شد. در آن، از طریق حذف لایه‌های اطلاعاتی تغییرات شاخص آسیب‌پذیری از رابطهٔ زیر مورد محاسبه قرار گرفتند:

$$\mathbf{S} = \left[\frac{\left|\mathbf{V}/\mathbf{N} - \mathbf{V}'/\mathbf{n}\right|}{\mathbf{V}}\right] \times \mathbf{100} \qquad (۲)$$

در این فرمول S میزان حساسیت، V و V′ به‌ترتیب شاخص‌های آسیب‌پذیری بدون حذف و با حذف پارامتر واحد هستند. هم‌چنین N و n تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبهٔ V و V′ می‌باشند. آسیب‌پذیری اصلی مدل دراستیک حاصل از کل هفت پارامتر به‌عنوان V و شاخص حاصل از حذف یک یا چند پارامتر به‌عنوان V′ در نظر گرفته می‌شود.

تحلیل حساسیت تک پارامتری، اثر هر کدام از پارامترهای دراستیک را بر روی شاخص آسیب‌پذیری ارزیابی می‌کند. این تحلیل حساسیت برای مقایسهٔ وزن واقعی هرکدام از پارامترها با وزن نظری اختصاص داده شده در مدل تحلیلی انجام می‌شود. وزن مؤثر یا وزن واقعی هر سلول با استفاده از رابطهٔ ۳ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{PrPw}/\mathbf{V}) \times \mathbf{100} \qquad (۳)$$

از آن‌جا که در مدل دراستیک وزن لایه‌ها براساس غلظت یون نیترات واسنجی شده است، بنابراین، می‌توان از آن برای صحت‌سنجی مدل هم استفاده کرد (Nakhaei et al., 2013؛ Asghari Moghadam et al., 2016). البته، لازم است غلظت نیترات آب زیرزمینی در نقاط با پراکندگی مناسب در اختیار باشد. در این مطالعه، صحت‌سنجی مدل با استفاده از مقادیر نیترات در آب زیرزمینی صورت گرفت. بدین‌منظور، غلظت نیترات آب زیرزمینی دشت سیرجان در ۲۳ نقطه با پراکندگی مناسب تعیین شد (جدول ۱۰) و صحت‌سنجی براساس ضریب همبستگی آن‌ها با شاخص دراستیک آن نقطه انجام شد.

جدول ۱۰- مقادیر، موقعیت و نام محل‌های سنجش نیترات و مقادیر شاخص دراستیک در آن محل‌ها

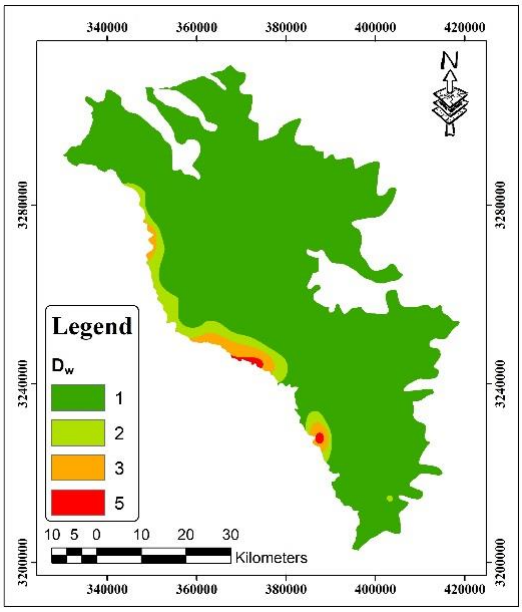
Table 10- Values, location and names of nitrate measurement locations and DRASTUC index values in those locations

ردیف	مختصات محل نمونه برداری (UTM)		غلظت نیترات (میلی‌گرم بر لیتر)	شاخص دراستیک	نام محل	نوع چاه
	X	Y				
1	391213.625	3236903.711	4.42	81	ملک‌آباد ۳	عمیق
2	391176.999	3236842.844	5.3	81	دارستان	عمیق
3	391184.917	3236848.59	6.18	81	ملک‌آباد ۲	عمیق
4	382758.998	3243797.788	6.19	90	ابراهیم‌آباد	عمیق
5	369532.996	3275744.683	6.63	86	حومه شمالی ۳	عمیق
6	381642.998	3284617.78	6.63	92	کران ۲	عمیق
7	382599.875	3285225.455	7.07	93	سعادت‌آباد	عمیق
8	369452	3251708	7.5	82	حوالی قائم‌آباد	عمیق
9	377343	3282478	7.9	90	شرکت سی بی جی	عمیق
10	385875	3252324	7.9	94	عزت‌آباد	عمیق
11	386451.999	3279601.815	8.3	97	یحیی‌آباد	عمیق
12	383853	3243117	8.4	90	نجف شهر-کف‌ریز	عمیق
13	397113.999	3232676.865	8.84	88	کف‌ریز	عمیق
14	370496.997	3275598.686	8.84	88	حومه شمالی ۲	عمیق
15	364836.788	3265923.502	8.84	101	نصرت‌آباد	عمیق
16	382566	3283825	9.3	93	اسحاق‌آباد	عمیق
17	368918	3274466	9.7	88	شهرک صنعتی شماره ۲	عمیق
18	392469	3271899	11.5	100	عرب‌آباد	عمیق
19	358734	3280978	12.3	100	حوالی زیدآباد	عمیق
20	386671	3279033	13.2	100	حسین‌آباد (قنات)	-
21	359788	3259338	14.1	104	حوالی ایزدآباد	عمیق
22	368559	3256062	14.5	104	محلهٔ آباده (چاه قاسم رفعتی)	عمیق
23	381391.998	3285063.781	15.47	109	کران ۱	عمیق
24	372462	3260356	17.2	110	بلوار شهید چمران شهرداری	عمیق

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نقشه‌های پارامترها

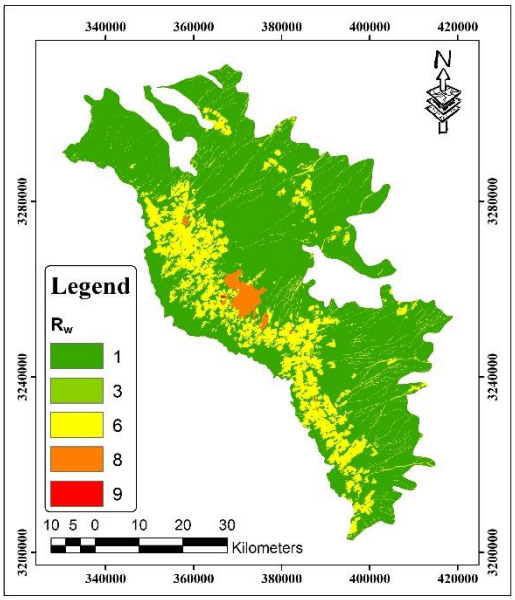
نقشهٔ رتبه‌بندی عمق آب زیرزمینی (شکل ۲) چهار رتبهٔ ۱، ۲، ۳ و ۵ را نشان می‌دهد. مفهوم این مقادیر این است که به علت زیاد بودن عمق آب در این دشت، این پارامتر استعداد آلودگی در این دشت را کاهش داده است. همان‌گونه که در نقشه ملاحظه می‌شود، بخش عمدهٔ آن به رنگ سبز (رتبهٔ ۱) تعلق دارد که معرف تأثیر کاهشی شدید بر استعداد آلودگی است. محدوده‌های رتبهٔ ۲، ۳ و ۵ به‌صورت بخش‌های کوچکی در غرب دشت دیده می‌شوند.



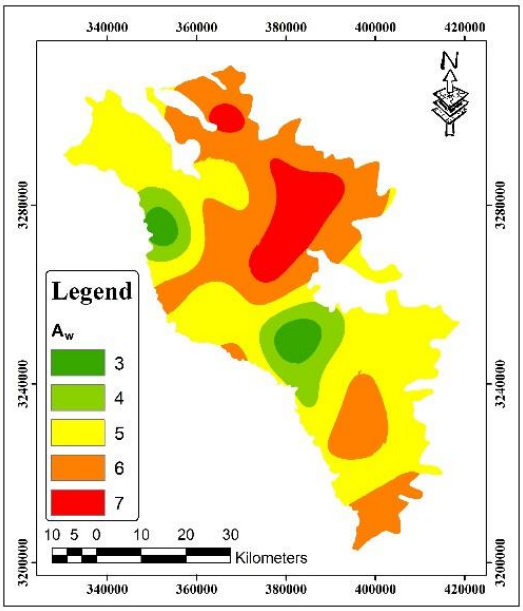
شکل ۲- نقشه رتبه‌بندی لایهٔ عمق آب
Figure 2- Depth of water rating map

در نقشهٔ رتبه‌بندی میزان تغذیه (شکل۳)، رتبه‌های ۱، ۳، ۶، ۸ و ۹ به چشم می‌خورند. بخش عمدهٔ سطح دشت (سبز تیره) دارای رتبهٔ ۱ است که در واقع سطوح عریان و فاقد هر نوع کاربری بوده و تنها منبع تغذیهٔ آن‌ها آب باران است. مناطق کشاورزی که دارای تغذیهٔ بیش‌تر ناشی از آب برگشتی کشاورزی هستند، به‌طور عمده با رنگ زرد (رتبهٔ ۶) در نیمهٔغربی دشت دیده می‌شوند. این سطوح استعداد آلودگی بیش‌تری از نظر میزان تغذیه سطحی دارند. محدوده‌های با رتبهٔ ۸ (قهوه‌ای) و ۹ (قرمز) محدوده‌های مسکونی هستند که تغذیهٔ ناشی از برگشت آب مورد استفاده در منازل را نشان می‌دهند.

در شکل ۴ نقشهٔ رتبه‌بندی جنس آبخوان ارائه شده است که در آن رتبه‌های ۳ تا ۷ به چشم می‌خورند. رتبه‌های ۵، ۶ و ۷ که در آن‌ها آبخوان از رسوبات نسبتاً درشت‌تر تشکیل شده بخش‌های وسیعی از این دشت را شامل می‌شوند. در محدوده‌های با رتبهٔ ۳ و ۴ آبخوان شامل رسوبات ریزتر است.

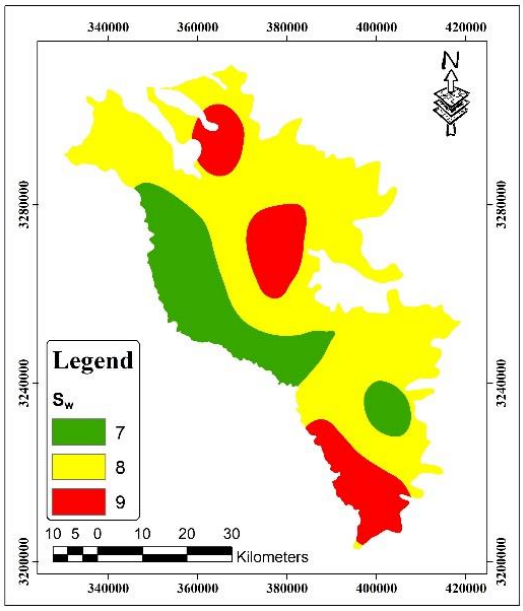


شکل ۳- نقشهٔ رتبه‌بندی لایهٔ میزان تغذیه
Figure 3- Net charge rating map



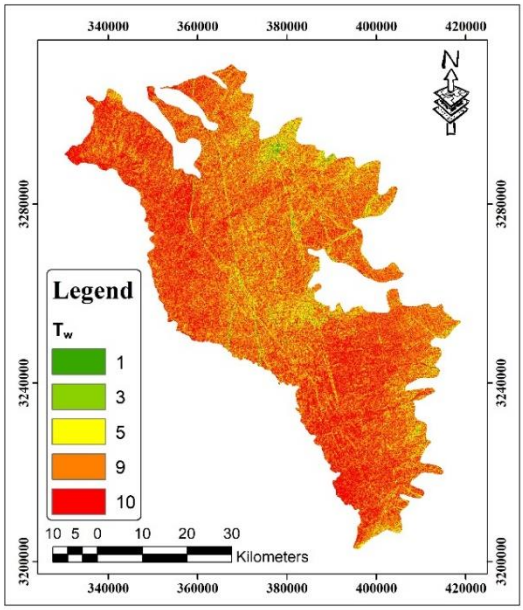
شکل ۴- نقشهٔ رتبه‌بندی لایهٔ جنس آبخوان
Figure 4- Aquifer media rating map

در شکل ۵ نقشهٔ رتبه‌بندی خاک سطحی ارائه شده است. سه محدوده با رتبهٔ ۷ (سبز تیره)، ۸ (زرد) و ۹ (قرمز) در این لایه غلبه دارند که اولی، شامل سطوح کفه‌ای غرب و جنوب دشت، متشکل از خاک‌های ریزدانه است. دومی (رنگ زرد) دربرگیرندهٔ بخش‌های وسیعی از شرق تا مرکز دشت است که در آن‌ها خاک سطحی درشت بافت است. در نهایت، شمال، جنوب و مرکز دشت یعنی سه محدوده، رتبهٔ ۹ را به خود اختصاص داده‌اند که معرف درشت بافت‌ترین خاک‌ها هستند.



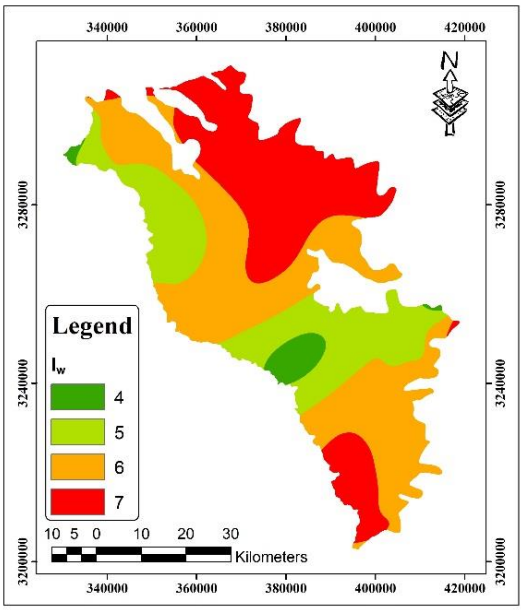
شکل ۵- نقشهٔ رتبه‌بندی لایهٔ جنس خاک سطحی
Figure 5- Soil media rating map

نقشهٔ رتبه‌بندی شیب توپوگرافی در شکل ۶ ارائه شده است. در آن، رتبه‌های ۱، ۳، ۵، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شوند. رتبه‌های ۹ و ۱۰ به سطوح بسیار کم شیب غرب و جنوب تعلق دارند و رتبهٔ ۵ به‌صورت سطوح پراکنده در مرکز و شمال دشت به چشم می‌خورد. سطوح کوچک ولی پرشیب متعلق به تپه‌ها، خاکریزها، حواشی راه‌آهن و جاده‌ها که دارای رتبه‌های ۱ و ۳ هستند به‌صورت پراکنده، ولی به میزان بسیار کم، دیده می‌شوند.



شکل ۶- نقشهٔ رتبه‌بندی لایهٔ شیب توپوگرافی
Figure 6- Topographic slop rating map

در نقشهٔ مربوط به تأثیر زون غیراشباع (Iw) رتبه‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ قرار دارند (شکل۷). این حاکی از تأثیر متوسط این زون است. رتبهٔ ۴ با کم‌ترین وسعت به‌صورت محدودهٔ کوچکی در مرکز دشت دیده می‌شود. رتبهٔ ۵ با گسترش بیش‌تر در مرکز و شمال دشت به چشم می‌خورد و رتبهٔ ۶ با بیش‌ترین سهم در محدوده‌هائی در شمال، مرکز و جنوب دشت گسترش دارد. بالاخره، محدودهٔ قرمز (رتبهٔ ۷) که متأثر از درشت‌ترین رسوبات در زون غیراشباع است در جنوب و شمال دشت قرار دارد.

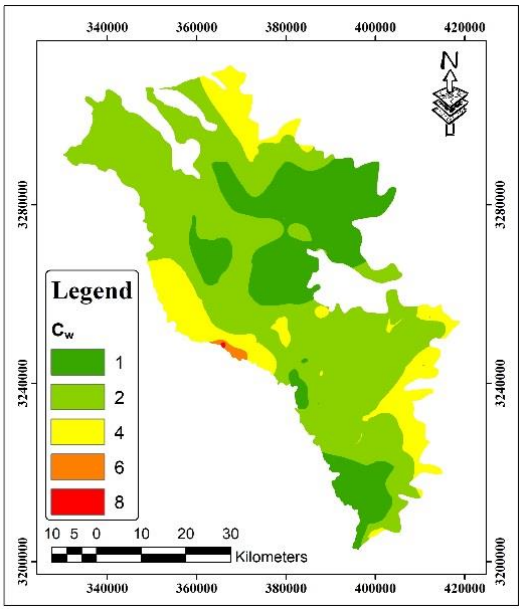


شکل ۷- نقشهٔ رتبه‌بندی لایهٔ زون غیراشباع
Figure 7- Vadose zone material rating map

نقشهٔ معرف تأثیر هدایت هیدرولیکی آبخوان (Cw) در شکل ۸ ارائه شده است. در این نقشه، رتبه‌های ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ مشاهده می‌شود. رتبه‌های ۱ و ۲ بیان‌گر هدایت هیدرولیکی کم هستند و با رنگ سبز مشخص شده و بخش عمدهٔ سطح دشت را پوشانده‌اند. سایر رتبه‌ها به‌صورت پراکنده در سطح دشت دیده می‌شوند.

۳-۲- نقشهٔ آسیب‌پذیری آبخوان

نقشهٔ آسیب‌پذیری آبخوان دشت سیرجان (شکل ۹) حاکی از تغییر مقادیر شاخص دراستیک (DI) در محدودهٔ ۶۰ تا ۱۲۸ است. مقادیر بالاتر که آسیب‌پذیری بیش‌تری نسبت به آلاینده‌های سطحی نشان می‌دهند تحت تأثیر تغذیهٔ سطحی بیش‌تر، شیب کم‌تر و عمق آب زیرزمینی کم‌تر، به‌طور عمده نزدیک به بخش‌های غربی دشت قرار دارند. این درحالی است که مقادیر کوچک و متوسط در شمال، مرکز و شرق دشت غلبه دارند.



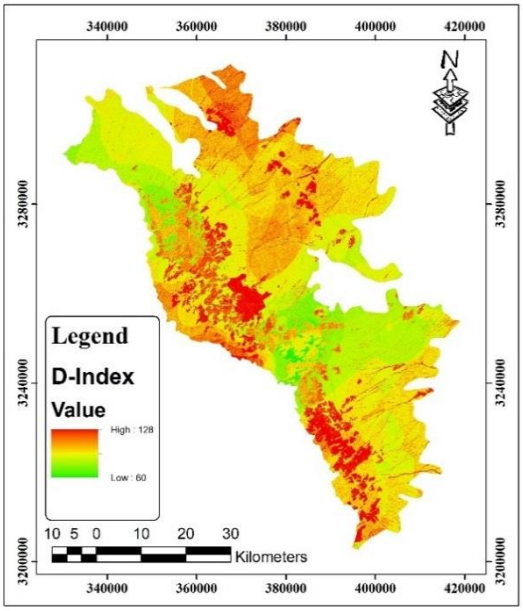
شکل ۸- نقشهٔ رتبه‌بندی لایهٔ هدایت هیدرولیکی آبخوان
Figure 8- Hydraulic conductivity rating map

نقشهٔ دراستیک کیفی شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در آن، مقادیر شاخص دراستیک در حد ۶۰ تا ۸۷، ۸۷/۱ تا ۱۰۰ و ۱۰۰/۱ تا ۱۲۸ به‌ترتیب به‌عنوان آسیب‌پذیری "کم"، "متوسط" و "زیاد" مشخص شده و با رنگ‌های سبز تیره، زرد و قرمز نشان داده شده‌اند. قابل ذکر است که در صورت مقایسه با جدول ۹، رتبه‌های بدون خطر تا خطر متوسط تعیین خواهند شد. محدوده‌های با آسیب‌پذیری بالا به‌طور عمده شامل سطوح کشاورزی، مناطق مسکونی و بستر آبراهه‌ها هستند. سطوح کشاورزی در معرض آلودگی ناشی از نیترات، آفت‌کش‌ها و املاح محلول قرار دارند. مناطق مسکونی نیز می‌توانند غلظت شوینده‌ها، نیترات و بعضی از فلزات سنگین در آب زیرزمینی را بالا ببرند. محدوده‌های با آسیب‌پذیری کم در شمال، غرب و مرکز دشت (محل‌های فاقد کاربری مشخص) گسترش بیش‌تری دارند، و سرانجام، محدوده‌های متوسط در شمال، جنوب و بخش‌هائی از غرب دشت به چشم می‌خورند.

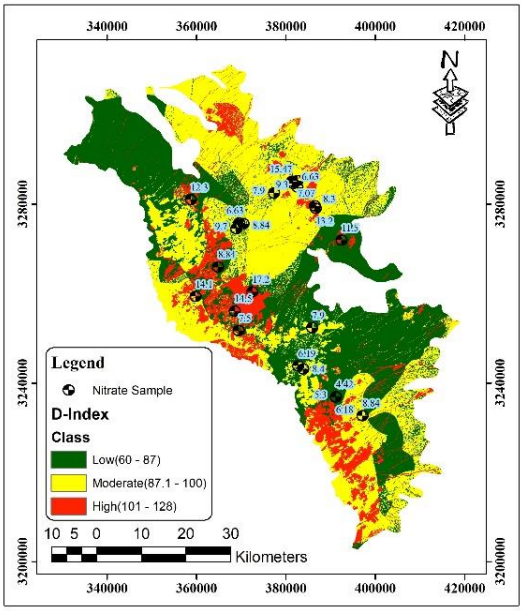
۳-۳- تحلیل حساسیت

۳-۳-۱- تحلیل حساسیت پارامتر واحد

وزن مؤثر هر پارامتر در تحلیل حساسیت تک پارامتری با وزن تئوری آن پارامتر مقایسه می‌شود. با مقایسهٔ پارامترها در جدول شماره ۱۰ می‌توان مشاهده نمود که از لحاظ وزن نظری پارامترهای عمق آب زیر زمینی (D) و تأثیر ناحیهٔ غیراشباع (I) به‌صورت مشترک با ارزش ۲۱/۷۴ درصد در رتبهٔ اول قرار می‌گیرند و بیش‌ترین تأثیر را از لحاظ نظری در مدل دراستیک دارند.



شکل ۹- نقشهٔ مقادیر شاخص دراستیک آبخوان
Figure 9- DRASTIC index values map



شکل ۱۰- نقشهٔ آسیب‌پذیری آبخوان همراه با موقعیت نقاط سنجش نیترات
Figure 10- Aquifer vulnerability map and locations of nitrate measurement points

تغذیه خالص (R) با ۱۷/۳۹ درصد در رتبهٔ دوم و پارامترهای محیط آبخوان (A) و هدایت هیدرولیکی (C) به‌صورت مشترک با ۱۳/۰۴ درصد در رتبهٔ سوم قرار دارند. جنس خاک (S) با ۸/۷۰ درصد و شیب توپوگرافی (T) با ۴/۳۵ درصد به‌ترتیب در رتبه‌های چهارم و پنجم واقع شده‌اند. با توجه به تحلیل انجام شده، می‌توان ناهمگونی‌هایی بین وزن تئوریک و وزن مؤثر پارامترهای DRASTIC در مدل دشت سیرجان مشاهده نمود که در جدول

۱۱ قابل مشاهده است. بر اساس این جدول، بیش‌ترین وزن مؤثر مربوط به تأثیر ناحیهٔ غیراشباع (I) با مقدار میانگین ۳۲/۷۸ درصد است که دارای وزن تئوریکی به اندازهٔ ۲۱/۷۴ درصد است. در تحلیل حساسیت به روش حذف لایه‌ها نیز شاخص DRASTIC بیش‌ترین حساسیت را نسبت به حذف پارامتر تأثیر ناحیهٔ غیراشباع دارد. محیط آبخوان و جنس خاک به‌ترتیب با مقادیر ۱۷/۴۱ درصد و ۱۷/۲۲ درصد به‌صورت تقریباً یکسان در رتبهٔ دوم و سوم قرار می‌گیرند که هر دو در مدل دشت سیرجان وزن مؤثری بیش از وزن تئوریک خود دارند. شیب توپوگرافی با مقدار میانگین وزن مؤثر ۹/۱۶ درصد در رتبهٔ چهارم قرار می‌گیرد و همانند پارامترهای قبل دارای وزن مؤثر بیش‌تری نسبت به وزن تئوریک (۴/۳۵ درصد) است. پارامترهای تغذیه خالص (۸/۰۷ درصد)، هدایت هیدرولیکی (۶/۴۱ درصد) و عمق آب زیر زمینی (۵/۵۴ درصد) برخلاف پارامترهای قبلی دارای وزن مؤثر کم‌تری نسبت به وزن تئوریک (به‌ترتیب با مقادیر ۱۷/۳۹ درصد، ۱۳/۰۴درصد و ۲۱/۷۴درصد) هستند که در رده‌های بعدی از نظر حساسیت مدل نسبت به این پارامترها قرار گرفته‌اند.

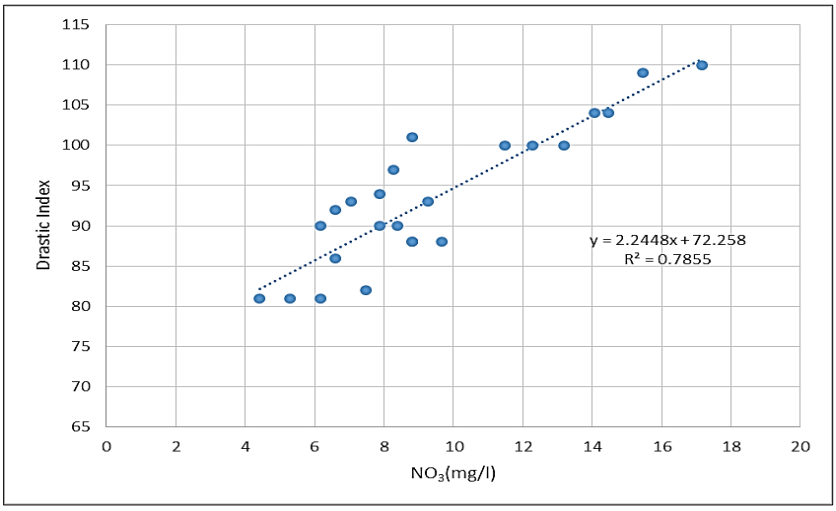
۳-۳-۲- تحلیل حساسیت از طریق حذف لایه‌ها

تحلیل حساسیت از طریق حذف لایه‌ها با استفاده از حذف پارامترها به‌ترتیب و به‌صورت متوالی در مدل DRASTIC دشت سیرجان انجام پذیرفت (جدول ۱۲). مدل DRASTIC دشت سیرجان بیش‌ترین حساسیت را نسبت به حذف اثر منطقه اشباع (۷/۴۴ درصد) نشان می‌دهد. این حساسیت بالا به‌دلیل وزن زیاد این پارامتر (وزن ۵) در مدل DRASTIC و هم‌چنین خصوصیات آن در دشت سیرجان است. تأثیر شیب توپوگرافی (۵/۸ درصد) دومین پارامتری است که مدل دشت سیرجان به حذف آن حساسیت زیادی نشان داده است که این امر به‌دلیل شیب کم‌تر از دو درصد در اکثر مناطق دشت سیرجان است. پارامترهای تغذیه خالص (۲/۹۲ درصد)، محیط آبخوان (۲/۷۲ درصد) و محیط خاک (۲/۵۳ درصد) به‌ترتیب دارای رتبه‌های سوم تا پنجم با اختلاف ناچیز هستند که مدل حساسیت کم‌تری نسبت به حذف آن‌ها دارد. کم‌ترین حساسیت مدل نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی (۱/۲۴ درصد) بوده که در رتبهٔ آخر قرار گرفته است.

باتوجه به شکل ۱۱، مشخص است که نقاط با نیترات بالا در محدودهٔ با استعداد آلودگی متوسط تا زیاد قرار دارند. این مؤید صحت مدل تهیه شده است. در عین حال، در این شکل همبستگی مقادیر شاخص دراستیک با مقادیر نیترات نشان داده شده است. پراکنش نقاط در این نمودار و نیز ضریب تعیین (R^2) در حد ۰/۷۹ مؤید صحت مدل تهیه شده هستند.

۴- نتیجه‌گیری

مقدار شاخص دراستیک سفرهٔ آب زیرزمینی دشت سیرجان در حد ۶۰ تا ۱۲۸ متغیر است که به معنی استعداد آسیب‌پذیری در حد کم تا زیاد است. بخش‌های غربی دشت که در آن تغذیهٔ سطحی ناشی از کشاورزی بیش‌تر بوده ولی شیب توپوگرافی و عمق آب زیرزمینی کم است دارای آسیب‌پذیری بیش‌تری هستند. محدوده‌های با آسیب‌پذیری کم در شمال غرب و مرکز دشت که کاربری خاصی به چشم نمی‌خورد قرار دارند. محدوده‌های با آسیب‌پذیری متوسط به‌صورت پراکنده در مرکز و شمال دشت قرار دارند.



شکل ۱۱- نمودار همبستگی شاخص دراستیک با مقادیر نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت سیرجان

Figure 11- DRASTIC index-nitrate correlation diagram

جدول ۱۱- تحلیل حساسیت پارامتر واحد

Table 11- Sensitivity analysis of parameters

پارامتر	وزن نظری (Pr)	وزن نظری (درصد)	نرخ پارامتر (Pw)				وزن مؤثر (W)			
			حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف از معیار	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف از معیار
عمق آب (D)	5	21.74	1	5	1.09	0.39	4	26	5.54	2.035
تغذیه (R)	4	17.39	1	9	2.049	2.09	3	35	8.07	7.83
جنس آبخوان (A)	3	13.04	3	7	539	0.89	8	25	17.41	2.82
جنس خاک (S)	2	8.70	7	9	7.96	0.6	11	24	17.22	2.02
شیب توپوگرافی (T)	1	4.35	1	10	8.66	1.75	0	15	9.16	2.14
زون غیراشباع (I)	5	21.74	4	7	6.01	0.83	19	44	32.78	4.25
هدایت هیدرولیکی (C)	3	13.04	1	8	2.07	0.97	2	24	6.41	3.11

جدول ۱۲- آمار به‌دست آمده از حذف لایه‌های اطلاعاتی

Table 12- The results taken from omitting the layers succesivly

پارامتر حذف شده	پارامترهای استفاده شده	تعداد پارامتر استفاده شده	شاخص (V' , V)				شاخص آسیب‌پذیری (S)			
			حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
-	D,R,A,S,T,I,C	7(N)	60	128	90.67	9.71				
D	R,A,S,T,I,C	6(n)	55	120	85.22	9.59	0	1.96	1.39	0.25
R	A,S,T,I,C	5(n)	50	96	77.01	6.96	0	5.71	2.92	1.32
A	S,T,I,C	4(n)	40	75	60.85	5.12	0	6.93	2.72	1.28
S	T,I,C	3(n)	26	59	44.92	4.69	0	7.01	2.53	1.25
T	I,C	2(n)	23	49	36.26	4.58	0	12.42	5.8	2.27
I	C	1(n)	3	24	6.21	2.91	0	11.7	7.44	3.01
C	D,R,A,S,T,I	6(n)	53	122	84.46	9.75	0	1.95	1.24	0.5

این مطالعه نشان داد که در آسیب‌پذیری آبخوان دشت سیرجان بیش‌ترین وزن مؤثر (۳۲/۷۸ درصد) مربوط به ناحیهٔ غیر اشباع است و محیط آبخوان و جنس خاک، به‌ترتیب با ۱۷/۴۱ و ۱۷//۲۲ درصد، در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. تحلیل حساسیت مدل ارائه شده با روش حذف متوالی پارامترها مشخص ساخت که منطقهٔ اشباع (I) با ۷/۴۴ در صد بیش‌ترین حساسیت را نشان می‌دهد. از این نظر، شیب توپوگرافی، تغذیه خالص، محیط آبخوان و محیط خاک به‌ترتیب در رتبه‌های دوم تا پنجم قرار می‌گیرند.

محدوده‌های با آسیب‌پذیری بالا به‌طور عمده شامل سطوح کشاورزی و مناطق مسکونی هستند که می‌توانند غلظت نیترات، شوینده‌ها، آفت‌کش‌ها، فلزات سنگین و املاح محلول آب زیرزمینی را افزایش دهند. بنابراین، لازم است با انجام اقداماتی نظیر کاهش استفاده از آفت‌کش‌ها، اصلاح روش‌های کشاورزی (نظیر تغییر از آبیاری غرقابی به قطره‌ای یا بارانی)، تسریع در راه‌اندازی شبکهٔ جمع‌آوری و تصفیهٔ فاضلاب شهر سیرجان، ورود آلاینده‌ها از طریق این مناطق مستعد را به آبخوان دشت سیرجان کاهش داد.

با توجه به افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در این دشت در دهه‌های اخیر، کاهش شدید منابع آب زیرزمینی، و نیز افزایش وابستگی به منابع آب زیرزمینی، حفاظت از منابع آب زیرزمینی محدود این دشت بسیار ضروری است. در عین حال، لازم است کاربری زمین در این دشت را بر اساس نقشهٔ استعداد آسیب‌پذیری آبخوان آن هماهنگ کرد. به‌طور کلی، در صورت ایجاد کاربری‌های جدید، بستگی به میزان و نوع آلاینده‌هائی که می‌توانند وارد زمین کنند، محدوده‌های با آسیب‌پذیری کم‌تر که در آن‌ها عمق آب زیرزمینی زیاد و زون غیراشباع ریزدانه (رسی) است در اولویت برای استقرار کاربری‌های آلاینده قرار گیرند.

منابع

اسحاقی ایل بیگی، س.، گنجی نوروزی، ز.، درستکار، و.، موحدنژاد، م.، و اطاری، م. (۱۴۰۱). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان سبزوار (شمال شرق ایران) با استفاده از مدل دراستیک. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۶(۱)، ۲۵۵-۲۶۶.

اصغری‌مقدم ا.، فیجانی ا.، و ندیری، ع. (۱۳۸۸). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی دشت‌های بازرگان و پلدشت با استفاده از مدل دراستیک بر اساس GIS. *محیط شناسی*، ۳۵(۵۲)، ۵۵-۶۴.

اصغری مقدم، ا.، ندیری، ع.، و پاک‌نیا، و. (۱۳۹۵). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بستان آباد با استفاده از روش DRASTIC و SINTACS. *هیدروژئومورفولوژی*، ۳(۸)، ۲۱-۵۲.

آقازاده، ن.، چیت‌سازان، م.، میرزایی، ی.، و ابراهیمی، ح. (۱۴۰۰). توسعه مدل دراستیک اصلاح شده DRAST-VUL برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان در مناطق شهری. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۳(۴)، ۶۹۰-۷۰۳.

چیت‌سازان، م.، و اختری، ی. (۱۳۸۵). پتانسیل‌یابی آلودگی آب‌های زیرزمینی در دشت‌های زویرچری و خران با استفاده از مدل دراستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *آب و فاضلاب*، ۱۷(۳)، ۳۹-۵۱.

سرتاج، م. (۱۳۸۷). مطالعات خاکشناسی استان کرمان با تاکید بر مکانیابی محل‌های دفن پسماندهای ویژه. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان حفاظت محیط زیست.

عباس‌نژاد، ا.، و شاهی‌دشت، ع. (۱۳۹۲). بررسی آسیب‌پذیری دشت سیرجان با توجه به برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی منطقه. *جغرافیا و آمایش شهری-منطقه‌ای*، ۳(۷)، ۸۵-۹۶.

قنبری، ع. (۱۳۹۹). بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خنج-فیشور لارستان با استفاده از مدل دراستیک. *جغرافیای طبیعی*، ۱۳(۴۷)، ۹۵-۱۱۵.

مهندسین مشاور آبخوان، (۱۳۹۲). بهنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کویرهای ابرقو- سیرجان.

مهندسین مشاور مهاب قدس، (۱۳۸۶). گزارش مطالعات دشت سیرجان.

نخعی، م.، امیری، و.، و رحیمی شهر بابکی، و. (۱۳۹۲). ارزیابی پتانسیل آلودگی و آنالیز حساسیت آب زیرزمینی در آبخوان خاتون‌آباد با استفاده از مدل دراستیک مبتنی بر GIS. *زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، ۳(۲)، ۱-۱۰.

نوری سنگراب، ث.، اصغری مقدم، ا.، کدخدایی، ع.، و کدخدایی، ف. (۱۴۰۰). تعیین مناطق آسیب‌پذیر آبخوان دشت عجب‌شیر با استفاده از بهینه‌سازی روش دراستیک با الگوریتم ژنتیک و منطق فازی. *اکوهیدرولوژی*، ۸(۲)، ۳۸۱-۳۹۵.

References

Abbasnejad, A., & Shahidasht, A.R. (2013). Vulnerability of Sirjan plain due to aquifer over abstraction. *Geography and Territorial Spatial Arrengement*, 3(7), 85-96 (in Persian).

Abkhan Consulting Engineers, (2013). Up-to-dating water resource balance of drainage basin of Abarghu-Sirjan (in Persian).

Aghazadeh, N., Chitsazan, M., Mirzaee, Y., & Ebrahimi, H. (2022). Modifying DRASTIC Model DRAST-VUL to determine groundwater vulnerability in an urban aquifer. *Watershed Engineering and Management*, 13(4), 690-703 (in Persian).

Akhavan, S., Mousavi, S.F., Abedi-Koupai, J., & Abbaspour, K.C. (2011). Conditioning DRASTIC model to simulate nitrate pollution case study: Hamadan–Bahar plain. *Environmental Earth Sciences*, 63(6), 1155-1167.

Aller, L., Bennett., T., Lehr, J., Petty, R., Hackett, G.,(1987), DRASTIC: a standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *US Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035)*.

Asghari Moghadam, A., Fijani, E., & Nadiri, A. A. (2010). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in the Bazargan and Poldasht Plains. *Journal of Environmental Studies*,35(52), 55-64 (in Persian).

Asghari Moghadam, A., Nadiri, A., & Pakniya, V. (2016). Vulnerability assessment of bostan abad plain aquifer using DRASTIC and Sintacs methods. *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(8), 21-52 (in Persian).

Barbash, J.E., & Resek, E.A. (1997). *Pesticides in ground water: distribution, trends, and governing factors*. 2th Edition: Ann Arbor Press, 616 pages.

Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. *Water*, 12(5), 1356.

Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A., Adamowski, J., & Nazemi, A.H. (2019). Delimitation of groundwater zones under contamination risk using a bagged ensemble of optimized DRASTIC frameworks. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(8), 8325-8339.

Barzegar, R., Moghaddam, A.A., & Baghban, H. (2016). A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz plain aquifer, Iran. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30(3), 883-899.

Chitsazan, M., & Akhtari, Y. (2006). Evaluating the potential of groundwater pollution in Kherran and Zoweircherry plains through GIS-based DRASTIC model. *Journal of Water and Wastewater*, 17(3), 39-51 (in Persian).

Eshaghi Ilbeygi, S., Ganji Norouzi, Z., Dorostkar, V., Movahednejad, M.H., & Atari, M. (2023). Vulnerability assessment of Sabzevar aquifer (Northeast of Iran) using DRASTIC model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(1), 255-266 (in Persian).

Fetter, C.W., Boving, T., & Kreamer, D. (1999). *Contaminant hydrogeology*. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, (Vol. 500).

Ghanbari, A. (2020). Investigating the vulnerability of Khanj plain aquifer-Larestan fissure using

DRASTIC model. *Physical Geography Quarterly*, 13(47), 95-115 (in Persian).

Gharekhani, M., Nadiri, A.A., Asghari Moghaddam, A., & Sadeghi Aghdam, F. (2015). Optimization of DRASTIC Model by support vector machine and artificial neural network for evaluating of intrinsic vulnerability of Ardabil Plain Aquifer. *Iranian journal of Ecohydrology*, 2(3), 311-324.

Kadkhodaie, F., Asghari Moghaddam, A., Barzegar, R., Gharekhani, M., & Kadkhodaie, A. (2019). Optimizing the DRASTIC vulnerability approach to overcome the subjectivity: a case study from Shabestar plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(16), 1-13.

Mahabghodss Consulting Engineers, (2007). Groundwater studies of Sirjan plain report (in Persian).

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.

Nakhaei, M., Amiri, V., & Rahimi-Shahrebabaki, M. (2013). Assessment of groundwater vulnerability and sensitivity analysis in Khatoon Abad aquifer using a GIS based DRASTIC model. *Advanced Applied Geology*, 3(2), 1-10 (in Persian).

Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., & Shafri, H.Z.M. (2014). Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(7), 3119-3131.

Nouri Sangarab, S., Asghari Moghaddam, A., Kadkhodaie Ilkhchi, A., & Kadkhodaie, F. (2021). Determining vulnerable areas of Ajabshir Plain aquifer using DRASTIC method optimization by genetic algorithm and Fuzzy Logic. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(2), 381-395 (in Persian).

Rezaei, F., Safavi, H.R., & Ahmadi, A. (2013). Groundwater vulnerability assessment using Fuzzy Logic: a case study in the Zayandehrood aquifers, Iran. *Environmental Management*, 51(1), 267-277.

Sartaj, M., (2008). Soil studies of Kerman province with an emphasis on locating hazardous wastes desposal's site. Final report of research project, Environmental Protection Organization (in Persian).

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.