

Evaluation of the composite DRASTIC index and the nitrate vulnerability index for groundwater resources pollution, case study: Kerman-Baghin Plain aquifer

Ali Bakhtiarizadeh¹, Mohammad Najafzadeh² and Sedigheh Mohamadi^{*3}

¹ Msc Student in Civil Engineering, Water Resources Engineering and Management, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

² Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

³ Associate Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Received: 25 December 2022

Accepted: 29 April 2023

Extended abstract

Introduction

The groundwater aquifer is one of the most vital resources, being considered more important in the countries (e.g., Iran) located in hot and dry areas. One of the ways to prevent contamination of groundwater resources is to focus on their vulnerability. So, a trustworthy assessment of groundwater vulnerability is useful to determine the contamination points of the aquifer for effective protection and management of groundwater resources.

Materials and methods

In this research, DRASTIC index was applied to evaluate groundwater susceptibility while considering effects of land use and nitrate pollution for Kerman-Baghein Plain located in Kerman Province. In this regard, seven parameters including the depth of the water table, net feeding of aquifer, aquifer texture, surface soil texture, topography, impact of the vadose zone, and hydraulic conductivity were employed to calculate the DRASTIC index. It should be noted that this index has previously been applied by researchers for assessment of the vulnerability of the aquifer against groundwater pollution in different regions. However, despite the complexities in the underground water system and the opinions of experts in assigning the rank and weight of the parameters in this index and the difference in the conditions prevailing in the studied areas, it has always prompted researchers to take practical steps to improve this index. This improvement has been carried out in a number of studies by adding other parameters (e.g., land use and the effect of nitrate) to the parameters of the DRASTIC index. Therefore, in the present research, the parameters of land use and potential risk associated with land use have been used to compute the Composite DRASTIC index (CD) and Nitrate Vulnerability Index (NVI) in the Arc/GIS software environment, respectively. In this way, the CD index was obtained by adding the land use parameter to the DRASTIC index and the NVI index by multiplying the raster map of the potential risk rating related to the land use in the DRASTIC index. It should be noted that according to the land use map evaluation, this plain includes 54% of low-density pastures, 24% of irrigated agriculture, 10% of hand-planted forests, 6% of bare and desert lands, 5% of residential areas, and 1% of claypans. After the evaluation of three vulnerability criteria using all three indices DRASTIC, CD and NVI, their correlation with Groundwater Contamination Risk (GCR) was also investigated.

Results and discussion

The results revealed that the correlation of the DRASTIC index with the risk of underground water pollution is 8%, the CD index is 30% and the NVI index is 54%, with a probability of 99%, they show a significant correlation. The results indicated that the addition of the land use parameter caused to increase the correlation of vulnerability with the risk of groundwater pollution, and multiplying the potential risk associated with land use led to further increase of the correlation. As a result, the NVI index was selected as the superior index compared to the other two indices.

* Corresponding author: s.mohamadi@kgut.ac.ir

Conclusion

The results of the NVI index of Kerman-Baghin Plain indicated that this plain is divided into two categories including very low vulnerability with an area of 1528.07 km² (75.52 %) having an NVI value of less than 70 and low vulnerability with an area of 495.33 km² (24.48 %) having NVI value from 70 to 110. Taken together, in order to properly manage the groundwater resources and prevent the pollution of these resources, it is recommended to prohibit the establishment of industries and the cultivation of agricultural sector causing the pollution in areas with low vulnerability.

Keywords: Aquifer pollution, Geographic Information System (GIS), Land use, Water depth, Water resources management

Cite this article: Bakhtiarizadeh, A., Najafzadeh, M., Mohamadi, S., 2024. Evaluation of the composite DRASTIC index and the nitrate vulnerability index for groundwater resources pollution, case study: Kerman-Baghin Plain aquifer. *Watershed Engineering and Management* 15(4), 554–569.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



ارزیابی شاخص مرکب DRATIC و شاخص آسیب پذیری نیترات در آلودگی منابع آب زیرزمینی، مطالعه موردی: آبخوان دشت کرمان-باغین

علی بختیاریزاده^۱، محمد نجفزاده^۲ و صدیقه محمدی^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

^۳ دانشیار، گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

چکیده مبسوط

مقدمه

سفره آب زیرزمینی، از مهمترین منابع آبی هر کشور، به خصوص کشوری مانند ایران است که در مناطق گرم و خشک قرار دارد. یکی از راه‌های پیشگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی، ارزیابی آسیب‌پذیری این منابع است. به طوری که ارزیابی قابل اعتماد آسیب‌پذیری آب زیرزمینی می‌تواند، در تعیین دقیق‌تر نقاط آسیب‌پذیر آبخوان برای حفاظت و مدیریت موثر منابع آب زیرزمینی مفید واقع شود.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، از شاخص DRATIC برای ارزیابی حساسیت آب‌های زیرزمینی، با در نظر گرفتن اثرات کاربری اراضی و آلودگی نیترات در دشت کرمان-باغین واقع در استان کرمان، استفاده شد. به این ترتیب، از هفت پارامتر عمق ایستابی، تغذیه خالص، بافت آبخوان، بافت خاک سطحی، توپوگرافی، تاثیر منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی برای محاسبه این شاخص استفاده شد. این شاخص، به صورت یک برآورد اولیه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در برابر آلودگی آب زیرزمینی در مناطق مختلف مورد پذیرش است. اما با وجود پیچیدگی‌هایی در سامانه آب زیرزمینی و نظرات کارشناسی در تخصیص رتبه و وزن پارامترهای موجود در این شاخص و تفاوت در شرایط حاکم بر مناطق مورد مطالعه، همواره پژوهشگران را بر آن داشته است که در بهبود این شاخص گام‌های عملی بردارند. این بهبود در تعدادی از پژوهش‌ها با اضافه کردن پارامترهای دیگر مانند کاربری اراضی و تاثیر نیترات، به پارامترهای این شاخص انجام شده است. لذا، در پژوهش حاضر نیز از پارامترهای کاربری اراضی و خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی به ترتیب برای محاسبه شاخص DRATIC مرکب یا Composite DRATIC (CD) و شاخص آسیب‌پذیری نیترات (Nitrate Vulnerability Index) استفاده شد. شاخص CD با اضافه کردن پارامتر کاربری اراضی به شاخص DRATIC و شاخص NVI، با ضرب نقشه رستر رتبه‌بندی خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی در شاخص DRATIC، به دست آمد. لازم به ذکر است که بر اساس نقشه کاربری اراضی، این دشت شامل ۵۴ درصد مراتع کم تراکم، ۲۴ درصد زراعت‌های آبی، ۱۰ درصد جنگل‌های دست کاشت، شش درصد اراضی بدون پوشش و کویری، پنج درصد مناطق مسکونی و یک درصد دق‌های رسی است. ارزیابی

سه معیار آسیب‌پذیری که با محاسبه سه شاخص DRASTIC، CD و NVI به‌دست آمد با همبستگی آن‌ها با خطر آلودگی آب زیرزمینی، مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که همبستگی شاخص DRASTIC با خطر آلودگی آب زیرزمینی هشت درصد، شاخص CD، ۳۰ درصد و شاخص NVI ۵۴ درصد، با احتمال ۹۹ درصد، همبستگی معنی‌داری را نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که اضافه شدن پارامتر کاربری اراضی، باعث افزایش همبستگی آسیب‌پذیری با خطر آلودگی آب زیرزمینی می‌شود و ضرب خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی به افزایش بیشتر این همبستگی کمک می‌کند. در نتیجه، شاخص NVI شاخص برتر نسبت به دو شاخص دیگر انتخاب شد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شاخص NVI، دشت کرمان-باغین را به دو طبقه آسیب‌پذیری خیلی کم با مساحت ۱۵۲۸/۰۷ کیلومتر مربع (۷۵/۵۲ درصد) با مقدار NVI کمتر از ۷۰ و آسیب‌پذیری کم با مساحت ۴۹۵/۳۳ کیلومتر مربع (۲۴/۴۸ درصد) با مقدار NVI ۷۰ تا ۱۱۰، تقسیم می‌کند. در مجموع، پیشنهاد می‌شود در محدوده‌هایی که آسیب‌پذیری کم است، برای مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از آلودگی این منابع، از احداث صنایع و کشت محصولات کشاورزی که باعث ایجاد آلودگی می‌شود، جلوگیری شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی آبخوان، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، عمق ایستایی، کاربری اراضی، مدیریت منابع آب

مقدمه

آسیب‌پذیری آبخوان به‌صورت آسیب‌پذیری ذاتی و آسیب‌پذیری ویژه تعریف می‌شود (Gogu et al., 2000). شیوه‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری وجود دارد که یک نوع از این روش‌ها، شاخص و هم‌پوشانی است (National Research, 1993).

مدل DRASTIC، روشی پرکاربرد از نوع شاخص و هم‌پوشانی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی است که نخستین بار آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده^۴ آن را معرفی کرده است (Aller et al., 1987). پژوهش‌های متعددی در راستای بهبود مدل DRASTIC انجام شده است. هرچه ارزیابی مناطق آسیب‌پذیر به واقعیت نزدیک‌تر و دقت عملکرد بالاتر باشد، تصمیم‌گیری‌ها در مدیریت منابع آب نیز موثرتر واقع می‌شود.

بررسی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی در بلندی‌های کاکامیگاهارا^۵ در استان گیفو^۶، ژاپن با

سفره آب زیرزمینی^۱، از مهمترین منابع آبی هر کشور به‌خصوص کشورهایمانند ایران است که در مناطق گرم و خشک قرار دارند. برای پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی آلوده و مصرف مجدد آن، اغلب باید وقت و سرمایه زیادی صرف کرد که موثرترین راه، پیشگیری از ورود آلاینده‌ها به این منبع است (Babiker et al., 2005). یکی از راه‌های پیشگیری آن است که آسیب‌پذیری^۲ آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفته و مناطق آسیب‌پذیر برای مدیریت منابع آب شناسایی شوند (Gharekhani et al., 2017).

کمیته ملی تحقیق آمریکا^۳ در سال ۱۹۹۳ مطرح کرد که آسیب‌پذیری آب زیرزمینی احتمال رسیدن آلاینده‌ها به منطقه‌ای مشخص در سامانه آب زیرزمینی پس از پیدایش آلاینده‌ها، در برخی مناطق، بالای سفره آب زیرزمینی است (National Research, 1993).

⁴ United States Environmental Protection Agency (USEPA)

⁵ Kakamigahara

⁶ Gifu

¹ Groundwater aquifer

² Vulnerability

³ National Research Council (United States)

آسیب‌پذیری غیر قابل توجه، کم و متوسط ارزیابی شد (Mfonka et al., 2018).

Entezari et al. (2018)، داده‌های هفت پارامتر مدل DRASTIC را جمع‌آوری کردند و با استفاده از نرم‌افزار Arc/GIS، نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد نظر را ایجاد شد. نتایج نشان داد تغییرات شاخص DRASTIC در محدوده ۶۸ تا ۲۲۵ است. خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی منطقه در پنج ناحیه آسیب‌پذیری تقسیم‌بندی شد که ۱۵/۹ درصد از منطقه در آسیب‌پذیری خیلی کم، ۲۰/۲۹ درصد در آسیب‌پذیری متوسط، ۲۴/۳۴ درصد در آسیب‌پذیری زیاد و ۱۳/۱۴ درصد در آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار دارد (Entezari et al., 2018).

در پژوهشی، با استفاده از مدل DRASTIC اصلاح شده و DRASTIC، آسیب‌پذیری آلودگی دشت ارومیه بررسی شد. اصلاح این مدل با کنترل رتبه‌ها و وزن‌های پارامترهای متفاوت، در GIS با توجه به مقدار همبستگی با غلظت نیترات آب زیرزمینی انجام شد. نتایج شاخص DRASTIC اصلاح شده، نشان داد که ۴/۳، ۳۰/۸ و ۶۴/۹ درصد دشت ارومیه به ترتیب در ناحیه آسیب‌پذیری کم، خیلی کم و بدون خطر آلودگی قرار دارد (Azizi Mobaser et al., 2019). Tomer et al. (2019)، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی در دهلی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، بیشترین آسیب‌پذیری به مرز شرقی دهلی و کمترین مقدار به قسمت جنوبی ناحیه مورد پژوهش اختصاص دارد.

همچنین، محققین از پارامترهای مدل DRASTIC برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه لیوا^۳ در امارات متحده عربی استفاده کردند. نتایج نشان داد، الگوی کاربری اراضی به‌عنوان یکی از پارامترهای ارزیابی واکنش انسان بر منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه است (Nazzal et al., 2019).

Voutchkova et al. (2021)، برای بررسی آسیب‌پذیری نیترات^۴ آب زیرزمینی از روش DRASTIC-N استفاده کردند. در این روش، برای اولین

استفاده از مدل DRASTIC نشان داد که ناحیه باختری سفره آب زیرزمینی کاکامیگاها را تحت غلبه طبقه‌بندی آسیب‌پذیری بالا قرار دارد، اما ناحیه خاوری، دارای آسیب‌پذیری متوسط است. همچنین، ناحیه مرتفع شمال شرقی منطقه مورد پژوهش، آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی کم را نشان داد (Babiker et al., 2005). Rahman et al. (2008)، در شهر علیگره^۱ هند برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر از نرم‌افزارهای ILWIS 3.0 و ArcView 3.2a GIS، در سفره‌های آب زیرزمینی کم عمق استفاده نمودند. طبق این بررسی، بیش از ۸۰ درصد از سفره آب زیرزمینی شهر، در معرض آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد آلودگی آب قرار دارد. نقشه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی بر اساس روش DRASTIC در منطقه لاهور پاکستان با استفاده از GIS تهیه شد که ناحیه پرخطر، ۲۸/۸ درصد و نواحی نسبتاً آسیب‌پذیر، ۴۶/۳ درصد را نشان داد، در حالی که مناطق بدون خطر ۱۰/۴ درصد بوده است (Muhammad et al., 2015). مدل DRASTIC، با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی ساده، اعتبارسنجی شد و ارتباط قوی بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و غلظت نیترات ($r=0.76$) را نشان داد (Zghibi et al., 2016).

در پژوهشی به‌منظور تهیه نقشه آسیب‌پذیری دشت کردکندی-دوزدوزان در شرق استان آذربایجان شرقی، از روش DRASTIC و DRASTIC واسنجی شده، با استفاده از داده‌های نیترات استفاده شد. نتایج نشان داد که با تصحیح وزن لایه‌ها، ضریب تبیین بین غلظت نیترات و آسیب‌پذیری مربوطه از ۰/۶۸ به ۰/۷۹ افزایش یافته است (Asghari Moghaddam et al., 2017). در آبخوان کم‌عمق در منطقه فومبان^۲، کامرون غربی با استفاده از مدل‌های DRASTIC و GOD، همراه با تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان پرداخته شد. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه به میزان ضعیف و متوسط، آسیب‌پذیر است. بر اساس روش GOD، سه سطح شاخص آسیب‌پذیری در برابر آلودگی شامل

⁴ Nitrate Vulnerability Index (NVI)

¹ Aligarh

² Fouban

³ Liwa

در این پژوهش بررسی آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه با روش‌های DRASTIC، مدل DRASTIC مرکب^۳ (CD) و آسیب‌پذیری نیترا (NVI) انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: دشت کرمان-باغین با مختصات جغرافیایی ۵۶°۱۸' تا ۵۷°۳۵' طول شرقی و ۲۹°۴۶' تا ۳۰°۳۲' عرض شمالی در کناره کویر لوت، در جنوب شرق ایران واقع شده است (Choubin et al., 2016). این منطقه یکی از ۱۲ ناحیه مطالعاتی حوزه آبخیز درانجیر و ساغند بوده است و در جنوب این حوزه آبخیز قرار دارد. آبراهه اصلی این محدوده، دو رودخانه چاری و سرشاخه رودخانه شور زرد است که در طول مسیر خود، آبراهه‌های کوچک و بزرگی به آن‌ها متصل می‌شوند. از مراکز جمعیتی مهم در این محدوده مطالعاتی می‌توان کرمان، ماهان و جوپار را نام برد. مساحت دشت کرمان-باغین ۵۴۲۰ کیلومتر مربع بوده که ۲۷۱۹ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات و ۲۷۰۱ کیلومتر مربع دیگر را دشت در برمی‌گیرد. آبخوان دشت، دارای مساحت ۲۰۲۳/۴ کیلومتر مربع است. بلندترین نقطه ارتفاعی در این حوضه، قله ۴۲۰۰ متری جوپار، در جنوب و کمینه ارتفاع در قسمت مرکزی دشت کرمان-باغین با ۱۷۰۰ متر ارتفاع، واقع شده است. شیب دشت از سمت جنوب و جنوب غرب به سمت شمال و شمال شرق بوده است و جهت جریان آب با شیب ملایم از شیب دشت تبعیت می‌کند. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

روش پژوهش: داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، شامل بارش، عمق آب زیرزمینی، لاگ حفاری چاه‌ها، مدل رقومی ارتفاعی^۴، هدایت هیدرولیکی، بافت خاک، کاربری اراضی و غلظت نیترا، است. بارش به صورت ماهانه برای چهار ایستگاه در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷، عمق آب زیرزمینی به صورت ماهانه برای ۳۸ چاه پیژومتری در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷، لاگ‌های حفاری چاه‌های پیژومتر، مدل رقومی ارتفاعی و هدایت هیدرولیکی از معاونت مطالعات پایه منابع آب شرکت

بار هفت پارامتر زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی (پارامترهای DRASTIC) را با یک پارامتر ژئوشیمیایی ترکیب کردند. DRASTIC-N منجر به نقشه‌هایی از آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به وسیله نیترا شد که همبستگی ۷۱ درصد میان آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با میزان نیترا را نشان داد. در بخش غربی ساحل نوار غزه فلسطین، به بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از مدل SWAT برای تخمین ضریب تغذیه در چارچوب DRASTIC پرداخته شد. به دلیل تلفیق مفهوم آسیب‌پذیری منطقه، عملکرد شاخص آسیب‌پذیری ۵۲ درصد بهبود یافت (Abunada et al., 2020).

پژوهشگران برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ذاتی آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی منطقه کینشاسا، جمهوری دموکراتیک کنگو^۱، از مدل آسیب‌پذیری پارامتریک DRASTIC استفاده کردند. برای کالیبراسیون و اصلاح از پارامترهای خاص آب زیرزمینی، رابطه آماری بین مدل اصلی DRASTIC و آلودگی نیترا، همچنین، از پارامتر کاربری اراضی اختصاصی محل پژوهش استفاده شد. به دنبال این اصلاح، ضریب همبستگی بین خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی و غلظت نیترا، در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ از $r=0/42$ برای مدل DRASTIC اصلی، به $r=0/61$ برای مدل کالیبره شده، بهبود یافت (Mfumu et al., 2017).

با توجه به مطالعات صورت گرفته، شاخص DRASTIC به صورت یک برآورد اولیه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در برابر آلودگی آب زیرزمینی در مناطق مختلف مورد پذیرش است. اما با وجود پیچیدگی‌هایی در سامانه آب زیرزمینی و نظرات کارشناسی در تخصیص رتبه‌ها و وزن‌های پارامترهای موجود در شاخص DRASTIC و تفاوت در مناطق مورد مطالعه، همواره پژوهشگران را بر آن داشته است که در بهبود شاخص DRASTIC گام‌های عملی بردارند. این بهبود در تعدادی از پژوهش‌ها با اضافه کردن پارامترهای دیگر مانند کاربری اراضی و تاثیر نیترا به پارامترهای شاخص DRASTIC انجام شده است. لذا،

³ Composite DRASTIC

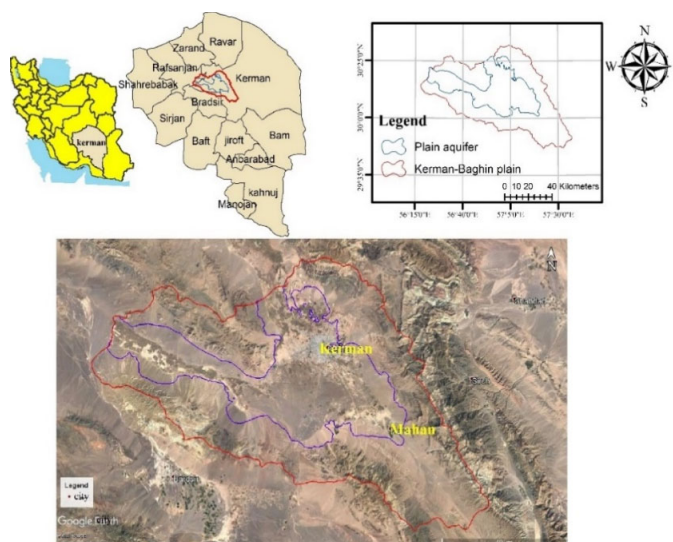
⁴ Digital Elevation Model (DEM)

¹ Kinshasa

² Democratic Republic of the Congo

رستری کاربری اراضی، با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کرمان تهیه شد.

سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان، تهیه شد. همچنین، ۱۱۷ نمونه بافت خاک تهیه شده در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، استفاده شد. نقشه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Fig. 1. Geographical location of the study area

$DRASTIC\ Index = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$ (۱)
که در آن، D, R, A, S, T, I, C نشان‌دهنده هفت عامل هیدروژئولوژیکی، w وزن و r رتبه مربوط به هر پارامتر از مدل DRASTIC است. برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری از محیط ArcMap 10.8 استفاده شد. با استفاده از ابزار Raster calculator، پس از تهیه نقشه رستری هر پارامتر مدل DRASTIC، طبق رابطه (۱) شاخص DRASTIC محاسبه شد. در نهایت، نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه تهیه و طبق جدول ۳، طبقه‌بندی شد.

جدول ۱- وزن‌های تعیین شده برای پارامترهای DRASTIC

(Aller et al., 1987)

Table 1. Determined weights for DRASTIC parameters (Aller et al., 1987)

Parameters (DRASTIC)	Weight
Depth to water	5
Net recharge	4
Aquifer media	3
Soil media	2
Topography	1
Impact of the vadose zone media	5
Hydraulic conductivity of the aquifer	3

شاخص DRASTIC: برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه، از مدل DRASTIC در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده شد. این مدل از ترکیب هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، بافت آبخوان، بافت خاک سطحی، توپوگرافی، تاثیر منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی، تشکیل شده است. هر یک از این پارامترهای هیدروژئولوژی، بر اساس طیف وسیعی از مقادیر، خود به زیربخش‌هایی تقسیم شده که با توجه به تاثیر بر آسیب‌پذیری از یک رتبه ۱۰ رتبه‌بندی شدند (Aller et al., 1987) که هر چه رتبه به ۱۰ نزدیک‌تر باشد، تاثیر آن زیربخش بیشتر است.

سپس، رتبه‌ها در وزن نسبی بین یک تا پنج ضرب شدند. مهم‌ترین عوامل، دارای وزن پنج و کمترین آن‌ها، دارای وزن یک است. در جدول ۱، وزن هر یک از پارامترها نشان داده شده است. رتبه‌بندی پارامترها متغیر بوده است که به کاربر اجازه می‌دهد تا مدل را متناسب با یک منطقه معلوم واسنجی کند (Dixon, 2005). مبنای رتبه‌بندی این پارامترها بر اساس جدول ۲ (Aller et al., 1987) است. بر اساس رابطه (۱) شاخص DRASTIC محاسبه شده است.

جدول ۲- رتبه‌بندی پارامترهای شاخص DRASTIC (Aller et al., 1987)

Parameter	Range	Rating	Parameter	Range	Rating
Depth to water (m)	9.1 - 15.2	5	Soil media	Clay	1
	15.2 - 22.9	3		Clay loam	3
	22.9 - 30.5	2		Silty loam	4
	>30.5	1		Loam	5
Topography(%)	<2	10		Sandy loam	6
	2 - 6	9		Clay	9
	6 - 12	5	Aquifer media	Sand, Silt, Clay	4
	12 - 18	3		Gravel, Sand, Silt, Clay	5
>18	1	Gravel, Sand		7	
Impact of the vadose zone media	Silt, Clay	3	Hydraulic conductivity (m/day)	0.04 - 4.1	1
	Sand, Silt, Clay	5		4.1 - 12.2	2
	Gravel, Sand	7		12.2 - 28.5	4

جدول ۳- طبقه‌بندی مربوط به شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC (Aller et al., 1987)

Class	Range
No	<79
Very low	79-100
Low	100-119

جدول ۵- محدوده آسیب‌پذیری مربوط به شاخص CD (Martínez-Bastida et al., 1998) و شاخص NVI (Secunda et al., 2010)

Vulnerability	index range CD	index range NVI
Very low	<100	<70
Low	100-145	70-110
Moderate	145-190	110-150

شاخص آسیب‌پذیری نیترات (NVI): به منظور دست‌یابی به دقت بیشتر در تخمین آسیب‌پذیری ویژه در برابر آلودگی نیترات، شاخص آسیب‌پذیری نیترات (NVI) که اقتباس دیگری از شاخص DRASTIC است، ایجاد شد که NVI بر مبنای تاثیر واقعی کاربری اراضی است. این مدل مخاطرات آلودگی آب‌های زیرزمینی به وسیله نیترات را با در نظر گرفتن کاربری اراضی (به‌عنوان منبع بالقوه نیتروژن) ادغام می‌کند (Baghapour et al., 2016). این امکان بر اساس ضرب کردن پارامتر جدید خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی در پارامترهای مدل DRASTIC تشکیل می‌شود که طبق رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$NV\ Index = \quad (3)$$

$$(D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w + L_r L_w) \times LU$$

شاخص DRASTIC مرکب (CD): برای بررسی اثر کاربری اراضی بر آسیب‌پذیری از شاخص (CD) استفاده شد. این شاخص، از همان پارامترهای شاخص DRASTIC با اضافه کردن پارامتر کاربری اراضی (L) تشکیل شده است و طبق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$CD\ Index = \quad (2)$$

$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w + L_r L_w$ که در آن، L_r رتبه و L_w وزن مربوط به پارامتر کاربری اراضی است (جدول ۴). با استفاده از ابزار Raster calculator رابطه (۲) پیاده‌سازی و نقشه حاصل با کمک ابزار Reclassify طبق جدول ۵، طبقه‌بندی شد.

جدول ۴- وزن و رتبه‌های مربوط به پارامتر کاربری اراضی مورد استفاده در شاخص CD (Secunda et al., 1998)

Land use type	Rating	Weight
Bare land and desert	1	5
Hand-planted forests	2	
Dry lake	5	
Low density pastures	6	
Urban areas	8	
Irrigated field crops	8	

آلودگی با زیاد شدن عمق تا سطح آب افزایش پیدا می‌کند، زیرا سطح آب عمیق‌تر موجب طولانی شدن زمان پیمودن این فاصله است. به همین دلیل، بیشترین وزن طبق جدول ۱، به عمق سطح آب زیرزمینی اختصاص داده شد (Tabarmayeh and Hir, 2015). به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی رستری عمق آب زیرزمینی از داده‌های ۳۸ پیژومتر استفاده شد. نتایج حاصل از این پهنه‌بندی در شکل ۲-الف ارائه شده است.

۲- **تغذیه خالص:** مقدار آبی که در واحد سطح خاک از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح آب زیرزمینی می‌رسد، تغذیه خالص تعریف می‌شود که مهمترین عامل برای جابجا کردن آلودگی به گستره آب زیرزمینی است (Aller et al., 1987). نقشه رستری تغذیه با روش پیسکوپو^۱ (Piscopo, 2001) تهیه شد. در این روش سه نقشه رستری بارش، شیب، نفوذپذیری خاک، با استفاده از ArcMap10.8 ترسیم شد. پس از تهیه نقشه توزیع مکانی این عوامل، رتبه‌بندی آن‌ها مطابق جدول ۵ و بر اساس رابطه (۴) هم‌پوشانی آن‌ها انجام و نقشه تغذیه خالص طبق جدول ۵، ارزش‌گذاری شد.

$$(۴) \text{ مقدار تغذیه} = \text{نفوذپذیری خاک} + \text{بارندگی (متر میلی)} + \text{شیب (\%)}$$

که در آن، LU رتبه‌های مربوط به لایه خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی (جدول ۶) است که در کل شاخص DRASTIC ضرب شد. برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری با استفاده از NVI مطابق رابطه (۳)، لایه خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی در کل شاخص DRASTIC ضرب شد و برای طبقه‌بندی نقشه آسیب‌پذیری با NVI ، از قسمت مربوط به این شاخص در جدول ۵ استفاده شد.

جدول ۶- رتبه‌بندی پارامتر خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی (Baghapour et al., 2015)

Table 6- Rating applied to the potential risk associated with land use (LU) (Baghapour et al., 2015)

Parameter	Land use type	Rating (LU)
Potential risk associated with land use (LU)	Bare land and desert	0.3
	Hand-planted forests	0.2
	Dry lake	0.3
	Low density pastures	0.2
	Urban areas	0.8
	Irrigated field crops	1

لایه‌های مورد نیاز در تهیه نقشه آسیب‌پذیری

۱- **عمق سطح آب:** در واقع، ضخامت موادی که آلاینده باید قبل از رسیدن آبخوان از آن عبور کند را تعیین می‌کند. حفاظت از سفره آب زیرزمینی در برابر

جدول ۵- رتبه‌بندی مربوط به نقشه تغذیه (Piscopo, 2001)

Table 5- Rating related to recharge map (Piscopo, 2001)

Net recharge		Soil permeability		Rainfall (mm)		Slope (%)	
Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range
10	11-13	5	High	4	>850	4	<2
8	9-11	4	Moderate to high	3	700-850	3	2-10
5	7-9	3	Moderate	2	500-700	2	10-33
3	5-7	2	Low	1	<500	1	>33
1	3-5	1	Very low				

۴- **بافت خاک:** اثر قابل توجهی در میزان تغذیه آب زیرزمینی دارد که حاوی تمام مواد بین بالاترین منطقه هوازدگی ناحیه غیراشباع، منطقه نفوذ ریشه گیاه و فعالیت‌های زیستی خاک است (Baghapour et al., 2014). نقشه بافت خاک مطابق جدول ۲، رتبه‌بندی شد.

۵- **توپوگرافی:** توپوگرافی به شیب، تنوع شیب سطح زمین و به کنترل احتمال خروج یک آلودگی یا باقی

۳- **بافت آبخوان:** بافت آبخوان، همان مواد ساختار آبخوان که شامل سنگ‌های تحکیم یافته و تحکیم نیافته است (Herlinger and Viero, 2007). نقشه رستری محیط آبخوان با بررسی اطلاعات لاگ‌های حفاری چاه‌ها پیژومتری با ArcMap10.8 تهیه و بر اساس جدول ۲، رتبه‌بندی انجام شد. بر اساس لاگ حفاری چاه‌ها محیط آبخوان بیشتر از شن، ماسه، سیلت و رس تشکیل شده است.

¹ Piscopo

استفاده از زمین به وسیله انسان است (Baghapour et al., 2015). نقشه رستر رتبه بندی کاربری اراضی بر اساس جدول ۳، در محیط ArcMap10.8 تهیه شد.

۹- **خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی:** خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی، همان نقشه کاربری اراضی است، با این تفاوت که رتبه های داده شده به هر کاربری بر اساس تاثیری است که آن کاربری می تواند در افزایش میزان نیترات در داخل زمین بگذارد. نقشه رستر رتبه بندی خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی از جدول ۴، استفاد شد.

ارزیابی عملکرد شاخص ها آسیب پذیری: برای ارزیابی اثربخشی عملکرد از شاخص آماری ضریب همبستگی^۱ (R) استفاده شد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (VI_i - \bar{VI})(GCR_i - \bar{GCR})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (GCR_i - \bar{GCR})^2 \sum_{i=1}^N (VI_i - \bar{VI})^2}} \quad (6)$$

که در آن، N تعداد داده ها، GCR_i مقدار خطر آلودگی آب زیرزمینی^۲ برای نقطه VI_i مقدار آسیب پذیری به دست آمده با شاخص آسیب پذیری برای نقطه VI_i میانگین مقدار آلودگی آب زیرزمینی و \bar{VI} میانگین مقدار آسیب پذیری است. از داده های خطر آلودگی آب زیرزمینی (GCR) به عنوان داده های کنترل برای هر شاخص استفاده شد. برای محاسبه GCR از رابطه (۷) استفاده شد (Barzegar et al., 2015).

$$GCR = \frac{VI_i}{VI_{max}} \times [NO_3]_i \quad (7)$$

که در آن، VI_i شاخص آسیب پذیری برای هر نقطه VI_{max} بیشینه آسیب پذیری محاسبه شده برای شاخص آسیب پذیری و $[NO_3]_i$ غلظت نیترات ($mg l^{-1}$)^۱ در هر نقطه VI_i است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تهیه نقشه های پایه مدل DRASTIC در شکل ۲، ارائه شده است.

ماندن یک آلودگی بر روی زمین اشاره دارد. شیب های کم، مجال بیشتری برای نفوذ آلودگی فراهم می کند و با پتانسیل بالاتر آلودگی آب های زیرزمینی همراه است (Tomer et al., 2019). نقشه توپوگرافی، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه مورد پژوهش در محیط ArcMap10.8 به درصد تهیه و بر اساس جدول ۲، رتبه بندی شد.

۶- **تاثیر منطقه غیراشباع:** منطقه غیراشباع، بر پتانسیل آلودگی آبخوان به نفوذ پذیری آن و ویژگی های میرایی محیط وابسته است. بسیاری از فرایندهایی که بر پتانسیل آلودگی اثر می گذارند، در نواحی غیراشباع روی می دهند، عبور و تضعیف مواد آلوده به آبخوان را اداره می کند (Yin et al., 2013). نقشه رستری تاثیر منطقه غیراشباع از روی ناحیه غیراشباع لاگ ها حفاری تهیه و طبق جدول ۲، رتبه بندی انجام شد.

۷- **هدایت هیدرولیکی:** هدایت هیدرولیکی، یک سفره آب زیرزمینی توانایی محیط سفره آب زیرزمینی (خاک و سنگ) برای انتقال آب از طریق فضا های منافذ یا شکستگی ها تعریف می شود که نقش مهمی در سرعت جابجایی و پراکندگی آلاینده ها دارد (Khosravi et al., 2018). این پارامتر برای دشت کرمان-باغین با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

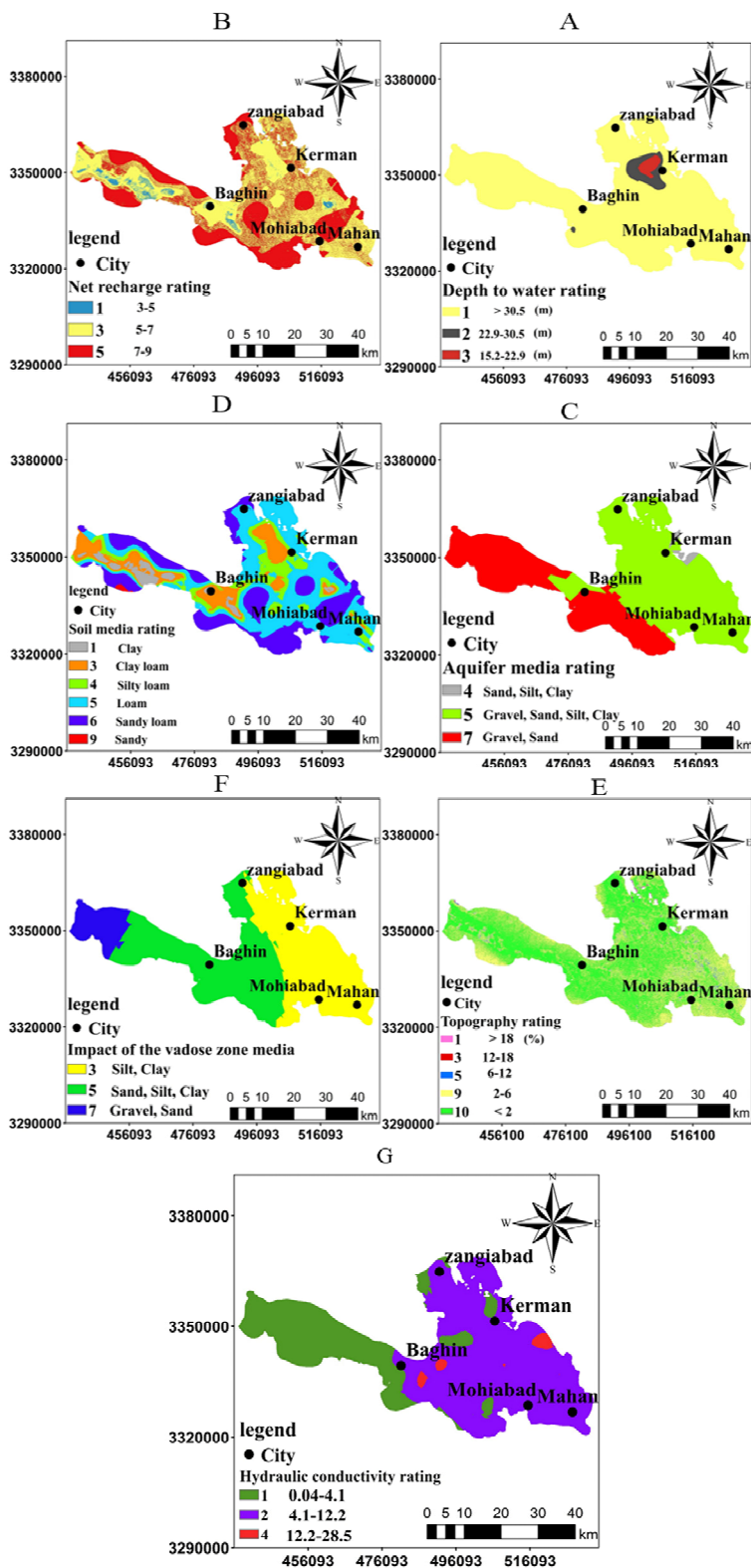
$$K = \frac{T}{b} \quad (8)$$

که در آن، T قابلیت انتقال آبخوان ($m^2 day^{-1}$)، b ضخامت آبخوان (m) و K هدایت هیدرولیکی ($mday^{-1}$) است. پس از برآورد هدایت هیدرولیکی، نقشه رستری آن در نرم افزار ArcMap10.8 برای کل ناحیه مورد پژوهش با استفاده از روش کریجینگ معمولی درون یابی و سپس، مطابق جدول ۲، طبقه بندی شد.

۸- **کاربری اراضی:** کاربری اراضی به معنای استفاده از زمین برای رفع نیازهای گوناگون انسان است. به عبارت دیگر، نقشه کاربری اراضی نشان دهنده فعالیت های انسانی در قسمت های مختلف سطح زمین و یا نحوه

² Groundwater Contamination Risk (GCR)

¹ Coefficient of correlation



شکل ۲- نقشه‌های رتبه‌بندی هفت‌لایه مورد استفاده در مدل DRASTIC و نقشه آسیب‌پذیری، (A) عمق تا سطح آب، (B) تغذیه خالص، (C) محیط آبخوان، (D) محیط خاک، (E) توپوگرافی، (F) تاثیر منطقه غیراشباع و (G) هدایت هیدرولیکی

Fig. 2. The seven-layer rating maps used in the DRASTIC model and the vulnerability map, (A) Depth to water, (B) Net recharge, (C) Aquifer media, (D) Soil media, (E) Topography, (F) Impact of the vadose zone media, (G) Hydraulic conductivity

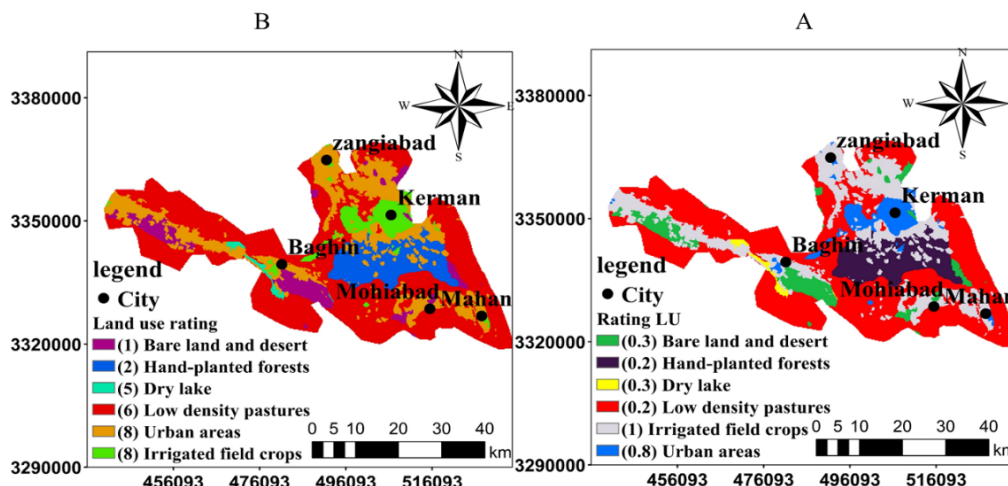
نقشه محیط خاک رتبه‌های ۱، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۹ به ترتیب ۴/۱، ۱۳/۴، ۱۴، ۴۱/۲، ۲۷ و ۰/۳ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را در برمی‌گیرد.

بر اساس توپوگرافی منطقه، این نقشه در رتبه‌های ۱ (۰/۰۶ درصد)، ۳ (۰/۰۹ درصد)، ۵ (۱/۵۵ درصد)، ۹ (۳۸ درصد) و ۱۰ (۶۰/۳ درصد) طبقه‌بندی شد. ۴۶ درصد از منطقه غیراشباع با رتبه ۳، ۴۴ درصد با رتبه ۵ و ۱۰ درصد باقی‌مانده با رتبه ۷، رتبه‌بندی شد. طبق رتبه‌بندی انجام شده برای هدایت هیدرولیکی، ۳۱ درصد از منطقه با رتبه ۱، ۶۷ درصد با رتبه ۲ و دو درصد با رتبه ۴، نمایش داده شد.

در شکل ۳، نتایج حاصل از تهیه نقشه کاربری اراضی و خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی که به ترتیب مورد استفاده در شاخص CD و NVI هستند، ارائه شده است.

نتایج حاصل از شکل ۲، حاکی از آن است که در نقشه رستر، عمق تا سطح آب ۹۵ درصد از مساحت منطقه در رتبه ۱، یعنی عمقی بیشتر از ۳۰/۵ متر، چهار درصد در رتبه ۲ با عمقی بین ۲۲/۹ تا ۳۰/۵ متر و یک درصد در رتبه ۳ با عمقی از ۱۵/۲ تا ۲۲/۹ متر، طبقه‌بندی شد. نقشه رستر تغذیه در سه رتبه ۱ (۲ درصد از منطقه) با محدوده تغذیه ۳ تا ۵، رتبه ۳ (۵۴ درصد از منطقه) با محدوده تغذیه ۵ تا ۷ و رتبه ۵ (۴۴ درصد از منطقه) با محدوده تغذیه ۷ تا ۹، رتبه‌بندی شد.

نقشه محیط آبخوان سه رتبه شامل رتبه ۴ (یک درصد متشکل از ماسه، سیلت و رس) قسمت شرق منطقه، رتبه ۵ (۶۲ درصد، متشکل از ماسه، سیلت، رس و شن) قسمت مرکزی، جنوب شرق، شمال و شمال شرق منطقه و رتبه ۷ (۳۷ درصد، متشکل از شن و ماسه) قسمت غربی منطقه، را دارا است. در رتبه‌بندی



شکل ۳- نقشه‌های رتبه‌بندی مربوط به (A) خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی و (B) کاربری اراضی

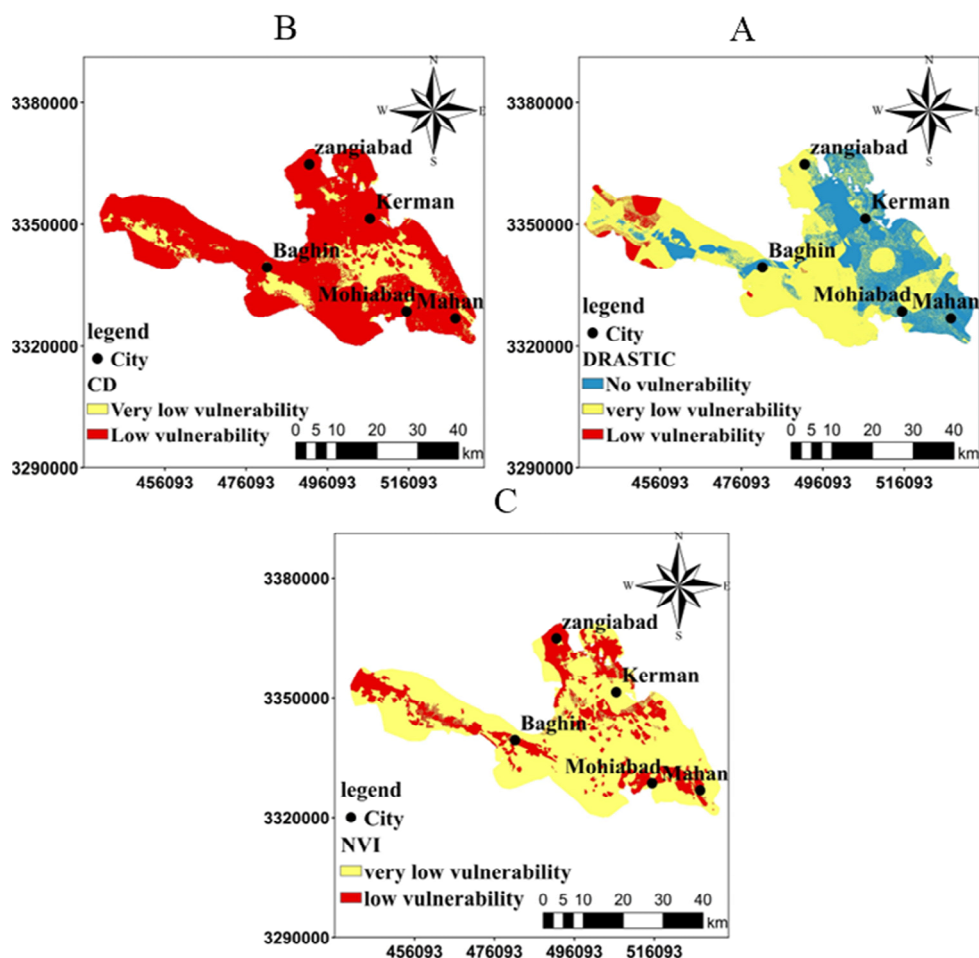
Fig. 3. Rating maps related to (A) potential risk associated with land use and (B) land use

نقشه آسیب‌پذیری با شاخص DRASTIC مرکب (CD): در شکل ۴-ب نتایج حاصل از ترکیب نقشه پارامترهای شاخص DRASTIC با کاربری اراضی و تهیه نقشه خطر آسیب‌پذیری آبخوان، ارائه شده است.

نقشه آسیب‌پذیری با شاخص آسیب‌پذیری نیترات (NVI): ضرب پارامترهای شاخص DRASTIC در پارامتر خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی، منجر به تهیه نقشه خطر آسیب‌پذیری آبخوان، شکل ۴-ب شد.

نتایج حاصل از شکل ۳، نشان می‌دهد که نقشه رتبه‌بندی کاربری اراضی از شش درصد اراضی بدون پوشش و کویر، ۱۰ درصد جنگل‌های دست کاشت، یک درصد دق‌های رسی، ۵۴ درصد مراتع کم تراکم، ۲۴ درصد زراعت‌های آبی و پنج درصد هم مناطق مسکونی، تشکیل شده است.

نقشه آسیب‌پذیری با شاخص DRASTIC: نتایج حاصل از ادغام نقشه‌ها و تهیه نقشه خطر آسیب‌پذیری آبخوان در شکل ۴-الف ارائه شده است.



شکل ۴- نقشه‌های آسیب‌پذیری منطقه مورد پژوهش با استفاده از سه شاخص، A: DRASTIC، B: CD، C: NVI
 Fig. 4. Vulnerability maps of the research area using three index, A: DRASTIC, B: CD, C: NVI

و مقدار CD کمتر از ۱۰۰ قرار دارد. ۱۶۷۱/۳۳ کیلومتر مربع (۸۲/۶ درصد) از مساحت کل منطقه با شاخص CD ۱۰۰ تا ۱۴۵ در ناحیه با آسیب‌پذیری کم قرار دارد. همچنین، نتایج حاصل از شکل ۴-ج نشان داد که طبق شاخص NVI از مساحت آبخوان ۲۰۲۳/۴ کیلومتر مربع، مساحتی در حدود ۱۵۲۸/۰۷ کیلومتر مربع (۷۵/۵۲ درصد) در منطقه با آسیب‌پذیری خیلی کم و مقدار NVI کمتر از ۷۰ قرار دارد. ۴۹۵/۳۳ کیلومتر مربع (۲۴/۴۸ درصد) از مساحت کل منطقه با NVI ۷۰ تا ۱۱۰ در ناحیه آسیب‌پذیری کم قرار دارد.

در بررسی صورت گرفته مشخص شد، همبستگی شاخص DRASTIC با خطر آلودگی آب زیرزمینی هشت درصد با احتمال ۵۸ درصد معنی‌دار است، اما شاخص CD همبستگی ۳۰ درصد و شاخص NVI همبستگی ۵۴ درصد با احتمال ۹۹ درصد، معنی‌دار

با توجه به شکل ۴-الف، از ۲۰۲۳/۴ کیلومتر مربع کل مساحت آبخوان، مساحتی در حدود ۷۲۲/۳۵ کیلومتر مربع (۳۵/۷ درصد) در ناحیه بدون خطر آسیب‌پذیری با شاخص DRASTIC، ۴۸ تا ۷۹ قرار دارد که به موازات حدود ۱۲۱۸/۰۸ کیلومتر مربع (۶۰/۲ درصد)، در منطقه با آسیب‌پذیری خیلی کم و مقدار DRASTIC ۷۹ تا ۱۰۰ قرار دارد. ۸۲/۹۵ کیلومتر مربع (۴/۱ درصد) از مساحت کل منطقه با شاخص DRASTIC ۱۰۰ تا ۱۱۹ در ناحیه با آسیب‌پذیری کم قرار دارد.

با توجه به شکل ۴-ب، شاخص CD منطقه مورد پژوهش را به دو طبقه آسیب‌پذیری خیلی کم و کم تقسیم‌بندی می‌کند که از ۲۰۲۳/۴ کیلومتر مربع مساحت آبخوان، مساحتی در حدود ۳۵۲/۰۷ کیلومتر مربع (۱۷/۴ درصد) در منطقه با آسیب‌پذیری خیلی کم

DRASTIC در ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از پارامتر کاربری اراضی، نشان از عملکرد بهتر نسبت به شاخص اصلی است. در مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های Martinez-Bastida et al., (2010) و Baghapour et al., (2016)، نتایج حاکی از سودمندی شاخص NVI در ارزیابی آسیب‌پذیری ناشی از نیترات است. در پژوهش Mfumu Kihumba et al., (2017)، از آلودگی نیترات و پارامتر کاربری اراضی استفاده شد که ضریب همبستگی از $r=0/42$ برای مدل DRASTIC اصلی، به $r=0/61$ در مدل کالیبره افزایش یافت. در پژوهش حاضر نیز، پارامتر کاربری اراضی باعث افزایش ضریب همبستگی از هشت به ۳۰ درصد شد. پیشنهاد می‌شود، در مناطق با آسیب‌پذیری کم، برای مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از آلودگی این منابع از احداث صنایع و کشت محصولات کشاورزی که باعث ایجاد آلودگی می‌شود، اجتناب کرد. همچنین، پیشنهاد ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با مدل‌های محاسبات نرم شامل مدل برنامه‌نویسی بیان ژن GEP، مدل رگرسیون چند متغیره تطبیقی اسپلاین‌ها (MARS) و رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی (EPR) از افق‌های این پژوهش است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این پژوهش، از شرکت آب منطقه‌ای استان کرمان بابت در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز طرح، تشکر می‌نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

بودن را نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که اضافه شدن کاربری اراضی باعث افزایش همبستگی آسیب‌پذیری با خطر آلودگی آب زیرزمینی می‌شود و ضرب خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی به افزایش بیشتر این همبستگی کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

برای بهبود شاخص DRASTIC، از خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی استفاده شد. به این ترتیب، نقشه‌های رستری رتبه‌بندی شده، پارامترهای شاخص DRASTIC شامل عمق تا سطح آب، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تاثیر منطقه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی با اضافه شدن نقشه رستری رتبه‌بندی شده کاربری اراضی به همراه وزن‌های هر پارامتر، نقشه آسیب‌پذیری شاخص CD در محیط نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی شد. با ضرب نقشه رستری رتبه‌بندی خطر بالقوه مرتبط با کاربری اراضی در شاخص DRASTIC، نقشه آسیب‌پذیری شاخص NVI ترسیم شد.

مطابق نتایج، از همبستگی هر شاخص با خطر آلودگی آب زیرزمینی (GCR) بیشترین همبستگی را شاخص NVI ($r=0/54$) دارد. طبق شاخص NVI، منطقه مورد پژوهش به دو دسته خیلی کم و کم آسیب‌پذیر تقسیم می‌شود که از مجموع ۲۰۲۳/۴ کیلومتر مربع مساحت آبخوان، مساحتی در حدود ۱۵۲۸/۰۷ کیلومتر مربع (۷۵/۵۲ درصد) در منطقه با آسیب‌پذیری خیلی کم و مقدار NVI کمتر از ۷۰ قرار دارد. ۴۹۵/۳۳ کیلومتر مربع (۲۴/۴۸ درصد) از مساحت کل منطقه با NVI ۷۰ تا ۱۱۰ در ناحیه آسیب‌پذیری کم قرار دارد.

نتایج مطالعات Secunda et al., (1998)، Panagopoulos et al., (2005)، در زمینه بهبود شاخص

منابع مورد استفاده

- Abunada, Z., Kishawi, Y., Alslaihi, T.M., Kaheil, N., Mittelstet, A., 2020. The application of SWAT-GIS tool to improve the recharge factor in the DRASTIC framework: case study. *J. Hydrol.* 592, 125613.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R.J., Hackett, G., 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 455 pages.

- Asghari Moghaddam, A., Soltani, S., Barzegar, R., Kazemian, N., 2017. Vulnerability assessment of Kordkandi-Duzduran Plain groundwater using calibrated DRASTIC model. *Iran-Water Resour. Res.* 13(4), 89-99 (in Persian).
- Azizi Mobaser, J., Masud Lak, M., Rasoulzadeh, A., 2019. Evaluation of intrinsic vulnerability of Urmia Plain groundwater pollution using original DRASTIC and modified Drastic model. *Iran-Water Resour. Res.* 14(5), 220-235 (in Persian).
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A., Hiyama, T., Kato, K., 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, Central Japan. *Sci. Total Environ.* 345(1-3), 127-140.
- Baghapour, M.A., Talebbeydokhti, N., Tabatabaee, S.H.R., Fadaei Nobandegani, A., 2014. Using DRASTIC and Composite DRASTIC (CD) models: the case of Shiraz Unconfined Aquifer. *J. Health Sci. Surveill. Syst.* 2(2), 54-65.
- Baghapour, M.A., Talebbeydokhti, N., Fadaei Nobandegani, A., Bagherzadeh, S., 2015. Water resources management with the approach of identifying the vulnerable areas of underground water using the latest proposed Nitrate Vulnerability Index (NVI) model, an aquifer case study Shiraz Unconfined Aquifer. *International Conference on Environmental Sciences, Engineering and Technologies, University of Tehran, Tehran* (in Persian).
- Baghapour, M.A., Fadaei Nobandegani, A., Talebbeydokhti, N., Bagherzadeh, S., Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Chitsazan, N., 2016. Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability for unconfined aquifer of Shiraz Plain, Iran. *J. Environ. Health Sci. Eng.* 14(1), 1-16.
- Barzegar, R., Moghaddam, A.A., Baghban, H., 2015. A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz Plain Aquifer, Iran. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 30(3), 883-899.
- Choubin, B., Sajedi-Hosseini, F., Azareh, A., Soleimani-Sardoo, F., 2016. Assessment of climate change at 2055 horizon on groundwater resources in Kerman-Baghin Plain. *Desert Management* 4(7), 1-11 (in Persian).
- Dixon, B., 2005. Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Appl. Geogr.* 25(4), 327-347.
- Entezari, M., Amiri, F., Tabatabaie, T., 2018. A GIS, DRASTIC techniques for assessing groundwater vulnerability in Torghabeh-Shandiz Watershed of Khorasan County. *J. GIS RS for Natur. Res.* 9(3), 19-32 (in Persian).
- Gharekhani, M., Nadiri, A., Asghari moghaddam, A., 2017. Using supervised committee machine artificial intelligent model for improving drastic model, case study: Ardabil Plain Aquifer. *Geosciences* 26(104), 113-124 (in Persian).
- Gogu, R.C., Dassargues, A., 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environ. Geol.* 39(6), 549-559.
- Herlinger, R., Viero, A.P., 2007. Groundwater vulnerability assessment in coastal plain of Rio Grande do Sul State, Brazil, using drastic and adsorption capacity of soils. *Environ. Geol.* 52(5), 819-829.
- Khosravi, K., Sartaj, M., Tsai, F.T.C., Singh, V.P., Kazakis, N., Melesse, A.M., Prakash, I., Bui, D.T., Pham, B.T., 2018. A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. *Sci. Total Environ.* 642, 1032-1049.
- Martinez-Bastida, J.J., Arauzo, M., Valladolid, M., 2010. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in Central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal* 18(3), 681-698.
- Mfonka, Z., Ngoupayou, J.N., Ndjigui, P.D., Kpoumie, A., Zammouri, M., Ngouh, A.N., Mouncherou, O.F., Rakotondrabe, F., Rasolomanana, E.H., 2018. A GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Fouban (Western-Cameroon). *Groundw. Sustain. Dev.* 7, 250-264.
- Mfumu Kihumba, A., Vanclooster, M., Longo, J.N., 2017. Assessing groundwater vulnerability in the Kinshasa region, DR Congo, using a calibrated DRASTIC model. *J. African Earth Sci.* 126, 13-22.
- Muhammad, A.M., Zhonghua, T., Dawood, A.S., Earl, B., 2015. Evaluation of local groundwater vulnerability based on DRASTIC index method in Lahore, Pakistan. *Geofis. Int.* 54(1), 67-81.
- National Research Council. 1993. Ground water vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. Washington, DC: The National Academies Press.
- Nazzal, Y., Howari, F.M., Iqbal, J., Ahmed, I., Orm, N.B., Yousef, A. 2019. Investigating aquifer vulnerability and pollution risk employing modified DRASTIC model and GIS techniques in Liwa area, United Arab Emirates. *Groundw. Sustain. Dev.* 8, 567-578.

- Panagopoulos, G.P., Antonakos, A.K., Lambrakis, N.J., 2006. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeol. J.* 14, 894–911.
- Piscopo, G., 2001. Groundwater vulnerability map explanatory notes. Centre for natural resource, New South Wales Department of land and water conservation, 10 Valentine Avenue, Parramatta New South Wales 2150.
- Rahman, A., 2008. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Appl. Geogr.* 28(1), 32-53.
- Secunda, S., Collin, M.L., Melloul, A.J., 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *J. Environ. Manage.* 54(1), 39-57.
- Tabarmayeh, M., Vaezi Hir, A., 2015. Investigation on vulnerability of Tabriz Plain unconfined aquifer. *J. Water Soil* 28(6), 1137-1151.
- Tomer, T., Katyal, D., Joshi, V., 2019. Sensitivity analysis of groundwater vulnerability using DRASTIC method: a case study of National Capital Territory, Delhi, India. *Groundw. Sustain. Dev.* 9, 100271.
- Voutchkova, D.D., Schullehner, J., Rasmussen, P., Hansen, B., 2021. A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). *J. Environ. Manage.* 277, 111330.
- Yin, L., Zhang, E., Wang, X., Wenninger, J., Dong, J., Guo, L., Huang, J., 2013. A GIS-based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in the Ordos Plateau, China. *Environ. Earth Sci.* 69(1), 171-185.
- Zghibi, A., Merzougui, A., Chenini, I., Ergaieg, K., Zouhri, L., Tarhouni, J., 2016. Groundwater vulnerability analysis of Tunisian coastal aquifer: an application of DRASTIC index method in GIS environment. *Groundw. Sustain. Dev.* 2-3, 169-181.