



Vulnerability Assessment of Malekan Alluvial Aquifer Using DRASTIC Model and Its Validation Using Receiver Operating Characteristic Curve

Mehdi Asadi¹ | Taghi Mahdavi²,

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Gonabad Branch of Islamic Azad University, Gonabad, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Maragheh Branch of Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

✉Corresponding Author: taghi.mahdavi@iau.ac.ir

Received:
16 January 2026

Revised:
05 March 2026

Accepted:
05 May 2026

Keywords:

Groundwater, Nitrate Concentration, DRASTIC Model, Receiver Operating Characteristic Curve.

Extended abstract

Introduction

Groundwater vulnerability assessment has received intensive research attention through various methods. Several methods have been developed for groundwater vulnerability assessment, which can be classified into four groups: (1) index-based and overlapping methods, (2) process-based simulation models, (3) statistical methods, and (4) hybrid methods (Taghavi et al., 2022). Among the index-based and overlapping methods, the DRASTIC method (Aller et al., 1986) is an important method that is the most widely used for groundwater vulnerability assessment.

In this study, nitrate measurement data at 15 points were used to validate the DRASTIC model, and finally, the model was validated through receiver operating characteristic (ROC) curves. Previous studies have used the DRASTIC model, but few have validated it with field data using nitrate concentration and ROC curves in the Lake Urmia region. The results of this study can be very useful for environmentalists and planners for the overall development of groundwater and water resources management.

Cite this article: Asadi, M. & Mahdavi, T. (2026). Vulnerability assessment of Malekan Alluvial Aquifer using DRASTIC model and its validation using Receiver Operating Characteristic curve. *Journal of Aquifer and Qanat*, 7 (1), 41-64. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2026.10880.1138>.



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee: Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

To conduct this research, the classic DRASTIC model was used, and seven raster maps of groundwater surface depth (D), net recharge (R), aquifer environment (A), soil environment (S), topography (T), impact of vadose zone (I), and hydraulic conductivity (C) were produced within the Malekan Plain.

The DRASTIC model is an important and widely used model for analyzing the potential vulnerability of groundwater pollution based on overlap analysis, which was first introduced by the United States Environmental Protection Agency (Rundquist et al. 1991). In this model, overlap analysis is based on the combination of 7 input parameters in the form of a raster map.

The use of the receiver operating characteristic (ROC) curve to determine the presence or absence of a disease is widely used in the medical field. In this study, the purpose of using the ROC curve is to classify the vulnerability status of an aquifer as positive or negative based on the results of a nitrate measurement test. The ROC curve is a graph of changes in sensitivity versus false positives.

Results and Discussion

In order to create the DRASTIC model, the raw data required to generate the input parameters were collected from different sources, and the input parameters were prepared in the form of a raster map. Then, the raster map was classified into subclasses according to Table 3 and presented in Fig 3. For each subclass in each layer, a rate was assigned based on its importance, and a uniform weight was also assigned to that layer. Finally, using the Editor tool in ARCGIS, columns related to the rate and weight and the product of the rate and weight (in the form of a total weight according to equation (1)) were added to the classified layers.

$$\begin{aligned} \text{Total weight} = \\ \text{Rate value assigned to the subclass of that layer} * \text{Weight value assigned to the layer} \end{aligned} \quad (1)$$

And the final map of the DRASTIC model is generated based on equation (2).

$$\begin{aligned} \text{Vulnerability Index (DRASTIC)} = \\ \text{DrDw} + \text{RrRw} + \text{ArAw} + \text{SrSw} + \text{TrTw} + \text{IrIw} + \text{CrCw} \end{aligned} \quad (2)$$

In equation 2, the parameters D, R, A, S, T, I, and C represent the seven parameters of groundwater surface depth, net recharge, aquifer environment, soil environment, topography, unsaturated zone effect, and hydraulic conductivity, respectively. r is the rate value assigned to the subclass, and w is the associated weight coefficient. For this purpose, the Raster Calculator tool has been used in ArcGIS using the Lookup function, as shown in Fig 4. Finally, the classified map of the DRASTIC model, as proposed by Wei et al. (2021) in Table 4, is presented in Fig 5. Based on the final DRASTIC map, 27 percent of the study area is classified as low vulnerability and 73 percent as medium vulnerability.

Validation of the DRASTIC model:

In this research, the method of comparing the results of vulnerability assessment with the actual occurrence of contamination was used to validate the DRASTIC model. For this purpose, measuring nitrate concentration in groundwater has been considered as an indicator of actual pollution. Nitrate concentration can represent the entry of pollution from the ground surface by passing through the soil layer and the unsaturated zone due to infiltration and has been used as an indicator of pollution in most research to validate vulnerability assessment (Wei et al., 2021; Boufekane et al., 2022; Huan et al., 2012). The level of groundwater contamination in terms of nitrate concentration is considered in Table 5 based on the recommendation of Jaunat et al. (2019). Fig 6 shows the nitrate concentrations measured for laboratory samples taken from groundwater at 15 scattered points in the fall of 2021 on the final vulnerability map. Fig 7 shows the relationship between the DRASTIC vulnerability index and the NO₃ concentration in groundwater, and the Pearson correlation coefficient between them is calculated to be $r=0.95$.

Receiver Operating Characteristic (ROC):

In this study, the non-parametric ROC curve- the empirical method- was used because in this method, the data group doesn't need to follow a normal distribution. In order to evaluate the vulnerability map obtained from the DRASTIC model by controlling the chemical index pollutant (nitrate), the values of the DRASTIC index obtained and the amount of nitrate measured at 15 random points are given and marked in Table 6. Finally, according to the results of Table 6, the ROC curve is drawn in Fig 8. For this diagnostic method to be meaningful, the AUC (Area under the Curve-ROC) should be greater than 0.5 and, in general, it should be greater than 0.8 to be considered acceptable. Table 7 presents the interpretation of the ROC curve based on the area under the curve suggested by Muller et al. (2005).

Given that the area under the curve in this study is close to 0.8, it can be said that the prepared DRASTIC model has a good degree of validity.

Conclusion

The fact that the conventional DRASTIC model ignores the effects of local hydrogeological conditions, such as existing and future land use activities, is an obvious flaw and may not be suitable for accurate groundwater vulnerability assessment. This limitation suggests that DRASTIC, in its classic form, can be used with caution when assessing groundwater vulnerability in different regions with specific hydrological characteristics and land use activities. Therefore, the potential use of hybrid models or additional validation techniques could be more reliable. Regional-scale assessment of aquifer vulnerability using GIS and DRASTIC can be used to depict areas that are likely to be contaminated. Vulnerability index maps are not used as a substitute for detailed local analysis, but as a screening tool. Because detailed local analyses are costly, these assessments can be used to identify areas of concern and as a tool for deciding whether detailed assessments are needed in such areas of concern.

The results of this study show that there is a small to medium vulnerable area of 35 km² in the northwestern part of the alluvial aquifer, which is under high recharge from the Mardagh Chay River. There is a relatively large vulnerable area of 95 km² at the end of the plain, which is mainly under shallow groundwater. In this vulnerable area, the groundwater depth is shallower due to the presence of impermeable rocks close to the ground surface; therefore, groundwater is more susceptible to pollution. The vulnerable area is the end of the plain, close to the flat area and evaporite floor on the edge of Lake Urmia, which is covered with very fine-grained, dense sediments and a salt flat. Therefore, to make groundwater healthier and more sustainable, and to provide clean groundwater to the people, the government must take special care of these areas. The presence of moderately vulnerable areas near cities and densely populated rural areas, if necessary measures are not taken, can be a warning sign for sustainable development in the future.



ارزیابی آسیب پذیری آبخوان آبرفتی ملکان با استفاده از مدل DRASTIC و اعتبارسنجی آن به کمک منحنی مشخصه عملکرد گیرنده

مهدی اسدی^۱ | تقی مهدوی^۲ ✉

۱. استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، گناباد، ایران.

۲. استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران.

✉ نویسنده مسئول: taghi.mahdavi@iaui.ac.ir

چکیده

راه های زیادی برای استخراج مناطقی از آب های زیرزمینی مستعد آلوده شدن وجود دارد تجزیه و تحلیل های دقیق محلی پرهزینه هستند، اما کاربرد مدل DRASTIC نسبت به روش های کمی و کیفی دیگر کم هزینه تر است. این مطالعه بر ارزیابی مناطق آسیب پذیر آب زیرزمینی در دشت آبرفتی ملکان در شرق دریاچه ارومیه متمرکز است که به جهت وجود جمعیت متمرکز و اراضی مستعد کشاورزی در کنار شهرک های صنعتی در حال رونق، به شدت در برابر آلودگی آسیب پذیر است. این مطالعه برای بررسی آسیب پذیری آب های زیرزمینی دشت ملکان توسط مدل DRASTIC به طور ابتکاری ابزارهای GIS را به همراه تکنیک های اعتبارسنجی با غلظت نیترات بکار گرفته است. با استفاده از تحلیل ROC، مدل دقت بالایی را نشان می دهد ($AUC=0.8$) و بینش های عملی را برای مدیریت پایدار آب ارائه می کند. نقشه آسیب پذیر نهایی نشان می دهد به میزان ۲۷ درصد از آبخوان دارای درجه آسیب پذیری کم و بقیه قسمت های آبخوان (۷۳ درصد) که درجه آسیب پذیری متوسط دارد، غالباً نرخ نفوذ بالا، خاک درشت بافت، عمق آب زیرزمینی کم و تراز آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین دارد. این تحقیق با شناسایی مناطقی که امکان نفوذ و پخش آلاینده ها از سطح زمین به آب های زیرزمینی در آن ها وجود دارد، کمک می کند تا از آلودگی منابع آب زیرزمینی جلوگیری شده و اقدامات پیشگیرانه و ترمیمی به موقع انجام گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

کلیدواژه ها:

آب زیرزمینی، غلظت نیترات، مدل DRASTIC، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده.

مقدمه

آب زیرزمینی ۹۹ درصد از ذخایر آب شیرین روی زمین را تشکیل می‌دهد و دردسترس‌ترین مخزن آب شیرین جهان هست که به‌عنوان منبع آب قابل‌اعتماد در برابر تغییرات فصلی و بلندمدت آب‌های سطحی به دلیل تنوع اقلیم استفاده می‌شود. آب‌های زیرزمینی اکنون تقریباً تأمین نیمی از کل آب آشامیدنی، ۴۰ درصد آب آبیاری و یک‌سوم آب صنعت جهان را تشکیل می‌دهند (Siebert et al., 2010). گسترش کشاورزی و آبیاری محرک اصلی افزایش برداشت آب زیرزمینی برای رفع نیازهای روبه‌رشد انسان است که منجر به کاهش قابل‌توجه آب‌های زیرزمینی در مراکز عمده کشاورزی و جمعیت شده است. مصرف آب زیرزمینی خانگی شهری و روستایی نیز افزایش چشمگیری داشته است بسیاری از سفره‌های زیرزمینی در معرض خطر نابودی هستند و یا خیلی آسیب دیده‌اند. تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی به دلیل ترکیبی از عوامل زمین‌زایی و انسانی و کاهش ذخیره آن‌ها در مقیاس بزرگ، چالش پایداری تأمین آب برای بشریت ایجاد می‌کند. کاهش شدید منابع آب زیرزمینی محلی می‌تواند تأثیر گسترده‌ای بر زنجیره‌های تولید کشاورزی داشته باشد و می‌تواند مهاجرت‌های انبوه و شکست اقتصادی را مانند تغییرات اقلیم تحریک کند (Lall et al., 2020).

ایران به‌عنوان یک نقطه شناخته‌شده در کاهش آب‌های زیرزمینی در جهان است به‌طوری که تعداد چاه‌های استخراج آب زیرزمینی تنها طی یک دوره ۱۴ ساله از سال ۲۰۰۲ از حدود ۵۴۶۰۰۰ به بیش از یک میلیون رسیده است (Noori et al., 2021). همچنین طبق گزارش‌های رسمی منتشرشده توسط مرکز تحقیقات مجلس ایران (IPRC, 2017)، آب زیرزمینی بیش از ۵۵ درصد نیاز آبی کشور را تأمین می‌کند و حدود ۵ کیلومتر مکعب از ۵۰ کیلومتر مکعب آب زیرزمینی استخراج‌شده سالانه، از

منابع آب زیرزمینی تجدیدنپذیر تأمین می‌شود. دسترسی آسان، قابلیت اطمینان، انرژی ارزان و نظارت ناکافی منجر به افزایش تعداد چاه‌های مجاز و غیرمجاز برای استحصال آب زیرزمینی شده است که منجر به نگرانی‌های ملی در مورد پیامدهای کیفیت آب‌شده است (Mirzavand et al., 2020). چاه‌های حفره شده با برداشت آب زیرزمینی از اعماق زمین و استفاده از آن در انواع مصارف بخشی از آن را با کیفیت نامطلوب به‌صورت آب برگشتی به آبخوان منتقل کرده و موجب آسیب‌پذیری آبخوان‌ها شده است. در این راستا ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در دشت‌های مختلف ایران حائز اهمیت است.

ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با روش‌های مختلف موردتوجه تحقیقات فشرده قرار گرفته است. روش‌های متعددی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی توسعه‌یافته‌اند که می‌توان آن‌ها را به چهار گروه طبقه‌بندی کرد: (۱) روش‌های همپوشانی و مبتنی بر شاخص (۲) مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر فرآیند، (۳) روش‌های آماری و (۴) روش‌های ترکیبی (Taghavi et al., 2022). از میان روش‌های همپوشانی و مبتنی بر شاخص، روش DRASTIC (Aller et al. 1986) روش مهمی است که پرکاربردترین روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی است. این مدل برای اولین بار توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده با موفقیت اجرا شد (Aller et al., 1986).

در طول ۵ سال گذشته این روش مبتنی بر GIS توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است مانند Ghosh et al. (2021) در ناحیه Birbhum هند، Pathak et al. (2021) در منطقه Haridwar هند، Boufekane et al. (2022) در منطقه دشت Mitidja در الجزایر، Elmeknassi et al. (2021) برای نقشه‌برداری در آبخوان‌های Bou-Areg and Gareb در شمال شرقی مراکش Khan et al. (2022) در منطقه مطالعاتی Al

اخیراً به‌کارگیری ویژگی‌های منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) در اعتبارسنجی مدل DRASTIC موردتوجه پژوهشگران محیط‌زیست قرار گرفته است (Liu et al., 2022; Mohammaddost et al., 2022; Khosravi et al., 2018; Ghosh et al., 2021).

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق (دشت ملکان) یکی از زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه هست. مشکل زیست‌محیطی دریاچه ارومیه یکی از مشکلات اساسی با اولویت کشور ایران است. بر اساس گزارش سازمان آب حجم دریاچه ارومیه در دی‌ماه ۱۴۰۱ به حدود ۱/۲۶ میلیارد مترمکعب رسیده که بیش از ۱۵/۷۰ میلیارد مترمکعب (حدود ۹۴ درصد) کمتر از وضعیت زمان اکولوژیک دریاچه است و در عمل دریاچه ارومیه به پلایا تبدیل شده است. دشت ملکان یکی از مناطق مستعد تولیدات باغی و زراعی در استان آذربایجان شرقی است که با توسعه شهرها و رشد روزافزون جمعیت، نیاز به مصرف آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی آن افزایش یافته است و در نتیجه استفاده از آب‌های زیرزمینی نیز سرعت بیشتری پیدا کرده است. در دهه گذشته سطح تراز آب زیرزمینی و کیفیت آب تغییرات محسوسی داشته است به‌طوری‌که در پایین‌دست دشت ملکان روستاها در معرض آلودگی شدید آب‌های زیرزمینی هستند و در دسترس بودن منابع آب زیرزمینی برای جمعیت رو به رشد بسیار کم است؛ بنابراین، در این شرایط، زمان بسیار مهمی است که به فکر مدیریت و احیای منابع آب زیرزمینی برای توسعه پایدار باشیم، در این راستا ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی آبخوان ملکان حایز اهمیت است. علیرغم نقش به‌سزای دشت ملکان در تولید محصولات کشاورزی استان آذربایجان شرقی به خصوص در تولید کشمش هنوز هیچ گونه مطالعات آسیب‌پذیری در این آبخوان صورت نگرفته است. هدف این مطالعه ارزیابی آسیب‌پذیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت

Khatim امارات متحده عربی، (Ahada & Suthar 2018) در پنجاب جنوبی، هند، (Lad et al. 2019) در منطقه Malwa Punjab در هند و در کل ایالات متحده (Zhan et al. 2024).

در دهه گذشته این روش توسط محققان زیادی در داخل کشور در دشت‌های مختلف ایران مورد استفاده قرار گرفته است مانند (Touzandejani et al. 2023) در دشت بلوک شراء، (Jozai and Ataee 2018) در دشت بهار همدان، (Ghanbarian, and Ahmadi Nadoushan 2019) در دشت لردگان، (Ebrahimi et al. 2018) در دشت یاسوج، (Bahrami and Shahidi 2021) در آبخوان کرمانشاه، (Bakhtiarizadeh et al. 2023) در دشت کرمان-باغین، (Valadi et al. 2024) در دشت دهگلان، (Farshi Baensaf et al. 2023) در دشت خضری و در نهایت (et al. 2025) در دشت لاهیجان فومنات روش DRASTIC را مورد استفاده قرار داده‌اند.

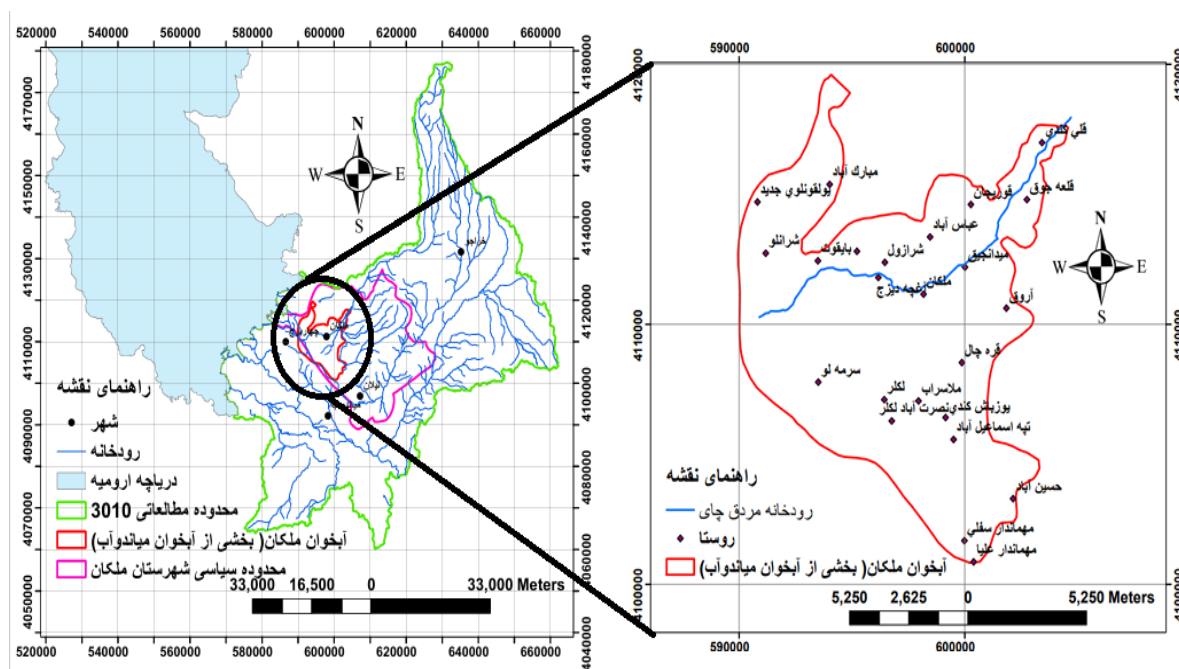
مدل DRASTIC از یک سیستم رتبه‌بندی عددی استفاده می‌کند که وزن نسبی را بر روی پارامترهای مختلف تعیین می‌کند که به ارزیابی آسیب‌پذیری نسبی آب‌های زیرزمینی به دلیل آلودگی کمک می‌کند. در این روش هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی شامل تراز عمق آب زیرزمینی، میزان شارژ، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی (شیب برحسب درصد)، تأثیر محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان گنجانده شده است. مدل DRASTIC یکی از مهم‌ترین مدل‌های پرکاربرد به دلیل حداقل نیاز به داده در خصوص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی است (Agyare et al. 2017). مزیت اصلی این مدل این است که عوامل کنترل‌کننده حرکت آلاینده‌ها در داخل آب‌های زیرزمینی را می‌توان در یک منطقه جغرافیایی بزرگ تخمین زد که به ارزیابی مناسب بودن آب‌های زیرزمینی برای استفاده انسانی و سایر کاربری‌ها کمک می‌کند (Ahada and Suthar 2018).

منطقه مورد مطالعه داخل یکی از محدوده‌های مطالعاتی دریاچه ارومیه تحت شماره کد ۳۰۱۰ در وزارت نیرو قرار دارد بخش کوهستانی این محدوده مطالعاتی کاملاً در استان آذربایجان شرقی و در محدوده سیاسی شهرستان‌های مراغه و ملکان واقع است؛ اما بخش دشت این محدوده مطالعاتی در داخل محدوده سیاسی دو شهرستان میاندوآب از استان آذربایجان غربی و شهرستان ملکان از استان آذربایجان شرقی واقع است. هدف این تحقیق بررسی آسیب‌پذیری بخشی از دشت محدوده مطالعاتی ۳۰۱۰ است که در داخل شهرستان ملکان واقع است. موقعیت جغرافیایی دشت آب‌ریتی ملکان به مساحت ۱۳۹ کیلومترمربع در شرق دریاچه ارومیه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. تراکم تعداد روستاها و شهرستان پرجمعیت ملکان در داخل آن و اشتغال عمده جمعیت در بخش کشاورزی با توجه به وجود رودخانه مردق چای و شبکه زرینه‌رود موجب استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها برای به‌دست‌آوردن حداکثر تولید شده است (Yekom Consulting Engineers, 2000).

آب‌ریتی ملکان با استفاده از مدل DRASTIC به همراه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. حداکثر معیشت منطقه عمدتاً به فعالیت کشاورزی بستگی دارد. به همین دلیل است که استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها نیز برای به دست آوردن حداکثر تولید برای جمعیت زیاد و متراکم منطقه متداول است. لذا در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل از داده‌های اندازه‌گیری نیترات در ۱۵ نقطه در داخل منطقه استفاده شده است و نهایتاً اعتبارسنجی مدل از طریق ویژگی‌های عملکرد گیرنده (ROC) انجام شده است. مطالعات قبلی مدل DRASTIC را به کار برده‌اند، اما تعداد کمی آن را با داده‌های میدانی با استفاده از غلظت نیترات و منحنی‌های ROC در منطقه دریاچه ارومیه تأیید کرده‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند برای محیط‌بانان و برنامه ریزان برای توسعه کلی آب‌های زیرزمینی و مدیریت منابع آب بسیار مفید باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت آب‌ریتی ملکان
Fig 1. Location of Malekan alluvial aquifer

تولید شده است. در جدول شماره ۱ منابع تهیه داده‌های خام ورودی مشخص شده و در شکل ۲ داده‌های خام ورودی برای تولید هرکدام از این نقشه‌های رستری و نمودار جریان روش‌شناسی انجام تحقیق نشان داده شده است.

برای انجام این تحقیق از مدل کلاسیک DRASTIC استفاده شده است و در راستا هفت نقشه رستری عمق سطح آب (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) در داخل محدوده دشت ملکان

جدول ۱. منابع اخذ داده‌های خام در تولید مدل DRASTIC

Table1. Reference of raw data for the production of the DRASTIC model

Application in DRASTIC model	Source	Type of Raw Data
Depth water level Raster	Iran Water Resources Management Organization website	Groundwater depth data in piezometric wells (2020-2021)
Net recharge Raster	Iran Water Resources Management Organization website	Maximum and minimum annual groundwater level
Specific yield (Sy); Net recharge Raster	East Azarbaijan Regional Water	Results of pumping tests of exploratory wells with a piezometer
Aquifer media Raster	East Azarbaijan Regional Water	Data from various 26 well logs
Vadose zone Raster	Ministry of Agriculture Jihad	Soil texture map of Iran
Soil media Raster	Iran National Cartographic Center; DEM_STRM30	Elevation points data and contour maps.
Percent Slope Raster	East Azarbaijan Regional Water	Geoelectrical data and geophysical surveys; Results of pumping tests
Aquifer thickness raster map; Hydraulic Conductivity Raster		

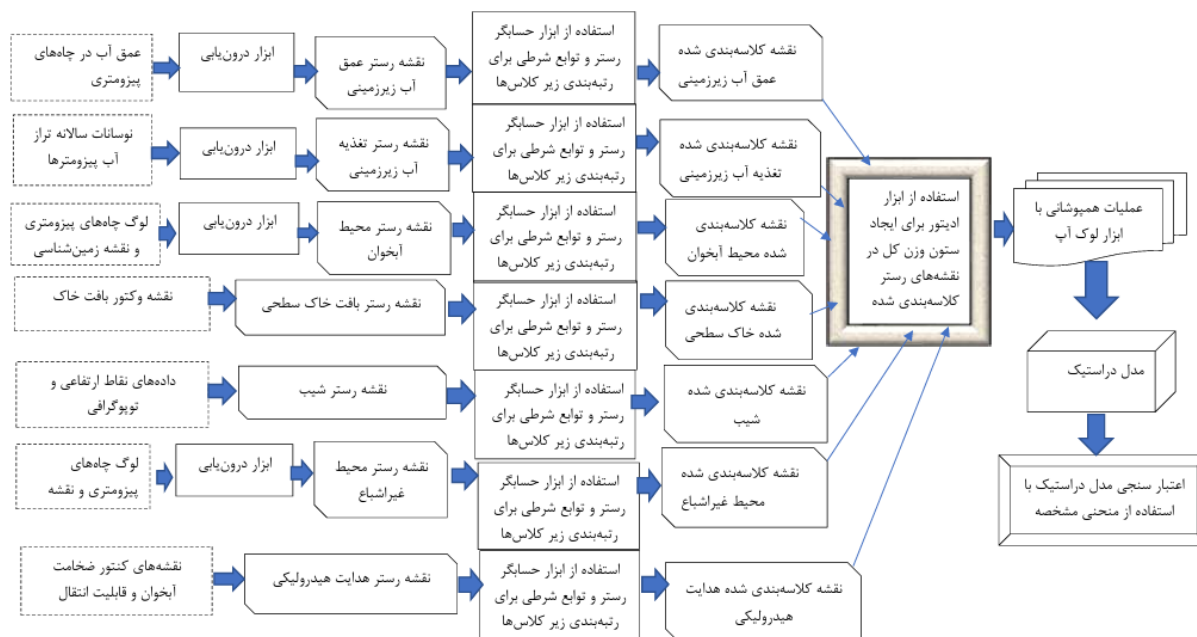
شروع آبیاری با آب شبکه آبیاری زربنه رود رخ می‌دهد و تراز آب زیرزمینی حداقل معمولاً در پایان شهریور می‌باشد. نقشه رستر محیط آبخوان (A) و نقشه رستر ناحیه غیراشباع (I) استفاده از داده‌های لاگ چاه‌های اکتشافی و مشاهده‌ای و پیزومتری و نقشه زمین‌شناسی محدوده تهیه شده است. برای تهیه نقشه رستر نوع خاک (S) از نقشه بافت خاک کشوری ارائه شده توسط وزارت جهاد کشاورزی تهیه شده است. برای تهیه نقشه رستر توپوگرافی (T) از داده‌های نقاط ارتفاعی و نقشه کنتور ارائه شده توسط سازمان نقشه‌برداری و سازمان جغرافیایی ارتش استفاده شده است. جهت تهیه نقشه رستر هدایت هیدرولیکی (C) از نقشه رستر ضخامت آبخوان و نقشه رستر ضریب قابلیت انتقال ارائه شده توسط سازمان آب با استفاده از نتایج داده‌های ژئوالکتریک و بررسی‌های ژئوفیزیکی استفاده شده است.

نقشه رستر عمق سطح آب (D) با استفاده از درون‌یابی داده‌های عمق آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری در داخل و یا نزدیک به محدوده دشت ملکان از دستور Topo to Raster از طریق ابزار تحلیل مکانی در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شده است. برای تهیه نقشه رستر تغذیه خالص (R) از روش تخمین تغذیه با روش نوسانات سطح ایستابی استفاده شده است. جهت استفاده از این روش نیاز به محاسبه ضریب آبدهی ویژه (Sy) و ترازهای آب زیرزمینی حداکثر و حداقل در سال آبی مورد مطالعه می‌باشد. با استفاده از نتایج آزمایش‌های پمپاژ چاه‌های اکتشافی مقادیر ضرایب قابلیت انتقال (T) و آبدهی ویژه (Sy) دشت محاسبه و درون‌یابی شده است. تراز آب زیرزمینی حداکثر در محدوده معمولاً در آخر خرداد و هم‌زمان با خاتمه بارش‌های بهاری و

محاسبات مدل DRASTIC

مدل DRASTIC یک مدل مهم و پرکاربرد برای تجزیه و تحلیل پتانسیل آسیب‌پذیری آلودگی آب‌های زیرزمینی مبتنی بر تحلیل همپوشانی است که برای اولین بار توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده معرفی شد (Rundquist et al. 1991). در این مدل تحلیل همپوشانی

بر اساس ترکیب ۷ پارامتر ورودی در قالب نقشه رستر است. هر پارامتر ورودی به زیررده‌های مختلف کلاسه‌بندی شده و در نهایت به زیرکلاس‌ها نرخ‌های متفاوت اعمال شده و یک خروجی واحد کلاسه‌بندی شده را می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۲. فلوجارت روش‌شناسی مورد استفاده در تحقیق

Fig 2. Flowchart of methodology used in the research

مشخصه عملکرد گیرنده (ROC)

استفاده از منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) برای تعیین وجود یا عدم وجود یک بیماری در زمینه پزشکی کاربرد زیادی دارد. در این تحقیق هدف استفاده از منحنی ROC طبقه‌بندی وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان به صورت مثبت یا منفی بر اساس نتایج آزمایش اندازه‌گیری نیترات است. منحنی ROC نمودار تغییرات حساسیت در مقابل مثبت کاذب (false positive) است؛ بنابراین لازم است

ابتدا معنی این دو پارامتر تعریف شود. حساسیت در این تحقیق به عنوان نسبت مشاهداتی از شاخص DRASTIC است که واقعاً یک درجه مشخص از آسیب‌پذیری را دارند و اندازه‌گیری نیترات هم آن درجه را تأیید می‌کند تعریف می‌شود. تعریف ریاضی این دو پارامتر در جدول ماتریس تصمیم به شرح جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲. ماتریس تصمیم (Nahm, 2022)

Table 2. Decision matrix (Nahm, 2022)

	Predicted condition	
	Test (+)	Test (-)
Event (+)	a	b
Event (-)	c	d

$$\begin{aligned} \text{sensitivity} &= a / (a + b) \\ \text{specificity} &= d / (c + d) \\ \text{false negative} &= b / (a + b) \\ \text{accuracy} &= (a + d) / (a + b + c + d) \\ \text{false positive} &= c / (c + d) \end{aligned}$$

نتایج و بحث

مراحل کلی ایجاد مدل DRASTIC

(۱) وزن کل = مقدار نرخ اختصاصی به زیر کلاس آن لایه × مقدار وزن اختصاصی به لایه

مرحله (۵) در این مرحله نقشه نهایی مدل DRASTIC بر اساس رابطه ۲ تولید شده است.

$$\begin{aligned} \text{Vulnerability Index (DRASTIC)} &= \text{DrDw} \\ &+ \text{RrRw} + \text{ArAw} + \text{SrSw} + \text{TrTw} + \text{IrIw} \\ &+ \text{CrCw} \end{aligned} \quad (2)$$

در فرمول ۲ پارامترهای D، R، A، S، T، I و C به ترتیب نشان‌دهنده هفت پارامتر عمق سطح آب، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر ناحیه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی هستند. r ضریب رتبه مرتبط و w ضریب وزن مرتبط است. به این منظور در محیط Gis از ابزار Raster calculator با استفاده از تابع Lookup مطابق شکل ۴ استفاده شده است. در اینجا برای درک صحیح از هر پارامتری ورودی به مدل DRASTIC، لایه‌های ورودی در مراحل بالا مورد بحث قرار گرفته است.

مرحله (۱) داده‌های خام مورد نیاز برای تولید پارامترهای ورودی از منابع مختلف مطابق جدول شماره ۱ جمع‌آوری شده است.

مرحله (۲) پارامتر ورودی در قالب نقشه رستر تهیه شده است.

مرحله (۳) پارامتر ورودی تهیه شده در قالب نقشه رستر به زیر کلاس‌هایی مطابق جدول ۳ طبقه‌بندی شده و در شکل ۳ ارائه شده است.

مرحله (۴) برای هر زیر کلاس در هر لایه بر اساس اهمیت نرخ تخصیص یافته و همین‌طور یک وزن یکنواختی هم برای آن لایه تخصیص یافته است و نهایتاً توسط ابزار Editor ستون‌های مربوط به نرخ و وزن و حاصل ضرب نرخ و وزن (در قالب وزن کل مطابق رابطه ۱) به لایه‌های کلاسه‌بندی شده اضافه شده است.

جدول ۳. نرخ و وزن اختصاص داده‌شده به زیررده‌های لایه‌های رستر ورودی مدل DRASTIC

Table 3. Rate and weight assigned to subcategories of input raster layers of DRASTIC model

Input raster layers	Sub-classes	Assigned Rate (R)	Assigned Weight (W)	Total Weight (R×W)	References
Depth to water level (m)	<1.5	10	5	50	Elmeknassi et al. (2021)
	1.5-4.6	9	5	45	
	4.6-9.10	7	5	35	
	9.10-15.20	5	5	25	
	15.20-22.80	3	5	15	
	22.80-30.40	2	5	10	
	> 30.40	1	5	5	
Net recharge (mm per year)	0-50	1	4	4	Wei et al. (2021)
	50-100	3	4	12	
	100-150	6	4	24	
	150-200	8	4	32	
	> 200	9	4	36	
Aquifer media	clay	1	3	3	
	Clay and silt	2	3	6	
	Clay or silt with some sand	3	3	9	

Soil media	Sand with a lot of clay or silt	4	3	12	Suggested by the authors
	Sand with a small amount of clay or silt	5	3	15	
	Gravel and Sand with a lot of clay or silt	6	3	18	
	Gravel and Sand with a little clay or silt	7	3	21	
	Sand	8	3	24	Boufekane et al. (2022)
	Gravel and Sand loam	9	3	27	
	Sandy Loam	4	2	8	
	0-2	7	2	14	
	2-6	10	1	10	Wei et al. (2021)
	6-12	9	1	9	
Topography (percent slope)	12-18	5	1	5	
	> 18	3	1	3	
	clay	1	1	1	Suggested by the authors based on concluding several similar research studies
	Clay and silt	1	5	5	
Impact of vadose zone	Clay or silt with some sand	2	5	10	
	Sand with a lot of clay or silt	3	5	15	
	Sand with a small amount of clay or silt	4	5	20	
	Gravel and Sand with a lot of clay or silt	5	5	25	
	Gravel and Sand with a little clay or silt	6	5	30	Wei et al. (2021)
	Gravel and Sand with a little clay or silt	7	5	35	
	Sand	8	5	40	
	Gravel and Sand	9	5	45	
	0-5	1	3	3	Wei et al. (2021)
	5-10	2	3	6	
Hydraulic conductivity (m/d)	10-20	5	3	15	
	20-30	7	3	21	
	> 30	10	3	30	

عمق تراز سطح آب زیرزمینی

عمق سطح آب نشان دهنده فاصله‌ای است که مواد آلاینده قبل از رسیدن به آب‌های زیرزمینی از آن عبور می‌کنند. بین عمق سطح آب و پتانسیل آلودگی آبخوان رابطه معکوس وجود دارد به طوری که با افزایش عمق سطح آب، احتمال آلودگی سفره‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد، زیرا مواد آلاینده زمان زیادی را برای طی کردن عمق تا سطح آب نیاز دارند (Khosravi et al., 2018; Tomer et al., 2019)؛ بنابراین بر اساس پیشنهاد Elmeknassi et al., (2021) در محدوده مطالعاتی حداکثر امتیاز ۱۰ به عمق کمتر از ۱/۵ و حداقل امتیاز ۳ به عمق ۱۵/۲۰-۲۲/۸۰ اختصاص داده شده است (جدول ۳). این لایه از داده‌های سطح آب ارائه شده توسط سازمان آب منطقه‌ای از مهر

۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰ برای ۲۷ چاه مشاهده‌ای به دست آمده و در شکل ۳ نشان داده شده است. درون‌یابی با استفاده از ابزار Topo to Raster در محیط ArcMap انجام شده است. این روش از تکنیک درون‌یابی تفاضل محدود تکراری استفاده می‌کند و به گونه‌ای طراحی شده است که از انواع داده‌های ورودی معمولاً در دسترس و ویژگی‌های شناخته شده سطوح ارتفاعی استفاده کند. این روش به گونه‌ای بهینه‌سازی شده است تا کارایی محاسباتی روش‌های درون‌یابی محلی، مانند درون‌یابی با وزن معکوس فاصله (IDW) را بدون از دست دادن تداوم سطحی روش‌های درون‌یابی جهانی، مانند کریجینگ و اسپلاین را داشته باشد.

تراز آب زیرزمینی حداکثر در محدوده معمولاً در آخر خرداد و هم‌زمان با خاتمه بارش‌های بهاری و شروع آبیاری

زیرینه قرار دارد و هم از بستر آبرفتی رودخانه مردق چای تغذیه می‌شود.

محیط آبخوان

محیط آبخوان به محیط ذخیره آب زیرزمینی در لایه‌های زیرزمینی رسوبی غیر تحکیم‌یافته یا سنگ‌های یکپارچه اطلاق می‌شود. اجزای تشکیل‌دهنده آبخوان نقش مهمی در محدودکردن آلاینده‌ها دارند. محیط متخلخل درشت‌دانه باعث افزایش سرعت انتقال آلودگی آب‌های زیرزمینی در مقایسه با مواد ریزتر می‌شود (Ghosh et al., 2021). در منطقه مورد مطالعه نوع محیط آبخوان آبرفتی است که پتانسیل آلودگی بیشتری دارد و بیشترین نرخ به مواد درشت‌تر مانند شن و ماسه و کمترین آن به مواد ریزدانه مانند رس و سیلت اختصاص داده شده است. اجزای تشکیل‌دهنده آبخوان از آنالیز ۲۶ لوگ چاه به دست آمده است.

محیط خاک

محیط خاک ظرفیت نفوذ و پتانسیل محدودکردن حرکت عمودی آلاینده‌ها به سمت ناحیه غیراشباع را برجسته می‌کند و حرکت مواد آلاینده از سطح زمین به سطح آزاد آب زیرزمینی در این محیط صورت می‌گیرد و به طور قابل توجهی مقدار و سرعت تغذیه آب زیرزمینی را توسط ظرفیت نفوذپذیری خاک که بستگی به بافت خاک دارد کنترل می‌کند. به‌طور کلی، مواد با بافت کوچک‌تر، مانند سیلت و خاک رس، نفوذپذیری را کاهش می‌دهند و حرکت مواد آلاینده را محدود می‌کند (Kozłowski and Sojka, 2019; Ghosh et al., 2021).

در منطقه مورد مطالعه نوع محیط خاک از نقشه بافت خاک کشوری ارائه شده توسط وزارت جهاد کشاورزی تهیه شده است و بیشترین نرخ به بافت درشت‌تر مانند شن و ماسه و کمترین آن به بافت ریزتر مانند رس و سیلت اختصاص داده شده است.

با آب شبکه زیرنه‌رود رخ می‌دهد و تراز آب زیرزمینی حداقل معمولاً در پایان شهریور می‌باشد. کم‌ترین عمق آب مربوط به جنوب منطقه مورد مطالعه در اراضی روستای حسین‌آباد می‌باشد و به تدریج به سمت مرکز آبخوان افزایش یافته و از مرکز آبخوان به سمت غرب و جوار دریاچه ارومیه بازهم کاهش می‌یابد.

شارژ خالص

شارژ خالص، مقدار آبی که از منابع مختلف مانند بارش، آب‌های سطحی و آب‌های برگشتی از مصارف مختلف به سمت سطح آب زیرزمینی حرکت می‌کند. این فرایند می‌تواند مواد آلاینده را از ناحیه غیراشباع به ناحیه اشباع منتقل کند بین حجم تغذیه و پتانسیل آلودگی آبخوان رابطه مستقیمی وجود دارد. حجم شارژ بیشتر، مواد آلاینده جامد و مایع بیشتری را به همراه داشت (Ghosh et al., 2021).

نرخ شارژ هم از نظر مکانی و هم زمانی متفاوت است. عوامل مؤثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی شامل ویژگی‌های بستر تغذیه مانند توپوگرافی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی، رطوبت خاک موجود و توانایی بسترهای تغذیه و مواد سفره آب برای جذب و انتقال آب است. به دلیل ناپایداری آب‌های زیرزمینی در اثر دوره‌های خشک‌سالی و تغییرات کاربری زمین امروزه علاقه به کمی‌سازی نرخ تغذیه افزایش یافته است (Natarajan et al., 2018).

در این تحقیق برای به دست آوردن نرخ شارژ خالص از روش تخمین تغذیه با استفاده از نوسانات سطح ایستابی استفاده شده است و برابر پیشنهاد Wei et al., 2021 نرخ ۹ به شارژ بیش از ۲۰۰ میلی‌متر در سال و نرخ ۱ به شارژ کمتر از ۵۰ میلی‌متر در سال داده شده است (جدول ۳). حداکثر شارژ در آبخوان آبرفتی مورد مطالعه در بخش‌های شرقی اتفاق می‌افتد که هم تحت پوشش شبکه آبیاری

شیب

شیب، کارایی رواناب سطحی و دوره زمانی نفوذ را تعیین می‌کند. بین زاویه شیب و میزان نفوذ رابطه معکوس وجود دارد. با شیب ملایم احتمال نفوذ آلاینده در داخل آبخوان (آسیب‌پذیری بالا) بیشتر است و بالعکس (Boufekane et al., 2022)؛ بنابراین بر اساس پیشنهاد (Wei et al., 2021) نرخ ۱ به شیب تند بیشتر از ۱۸ درصد و نرخ ۱۰ به نواحی با شیب کمتر از ۲ درصد نسبت داده شده است (جدول ۳). در این تحقیق نقشه شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های نقاط ارتفاعی و نقشه کنتر ارائه شده توسط سازمان نقشه‌برداری و سازمان جغرافیایی ارتش استفاده شده است و کل منطقه مورد مطالعه دارای میانگین شیب نیم درصد است.

ناحیه غیراشباع

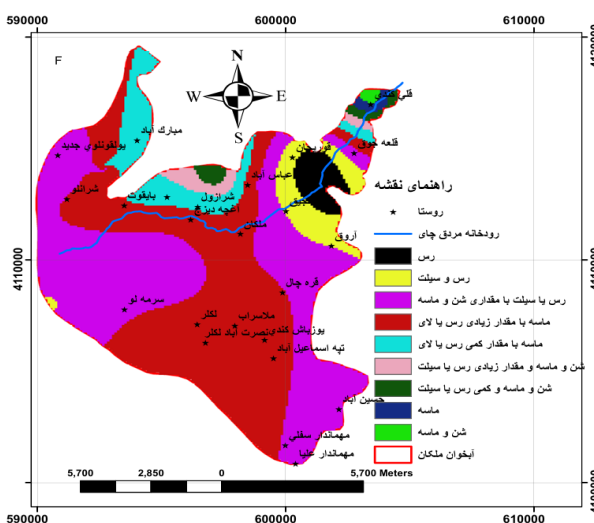
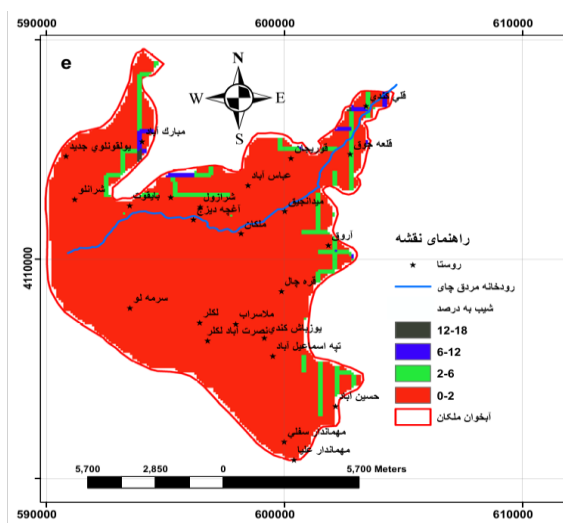
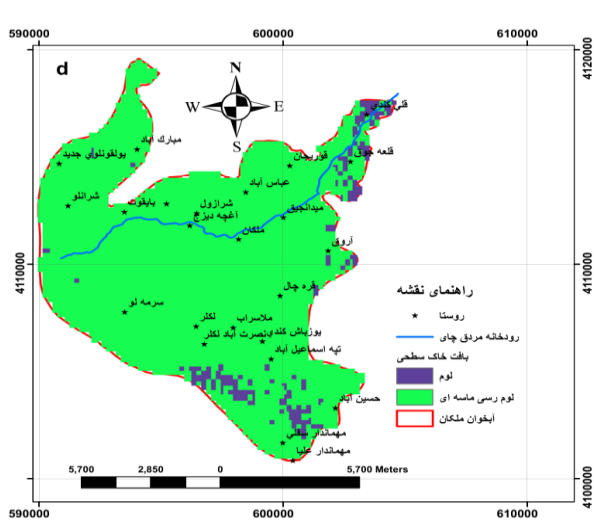
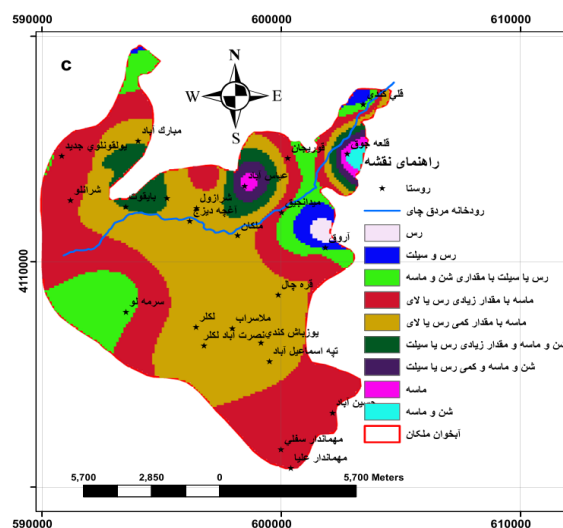
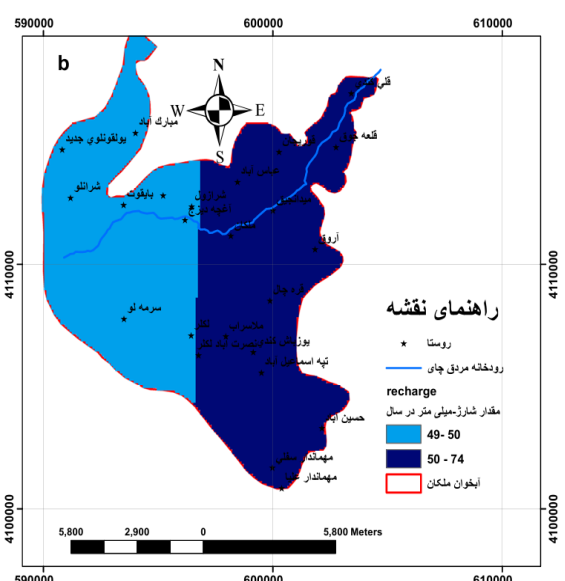
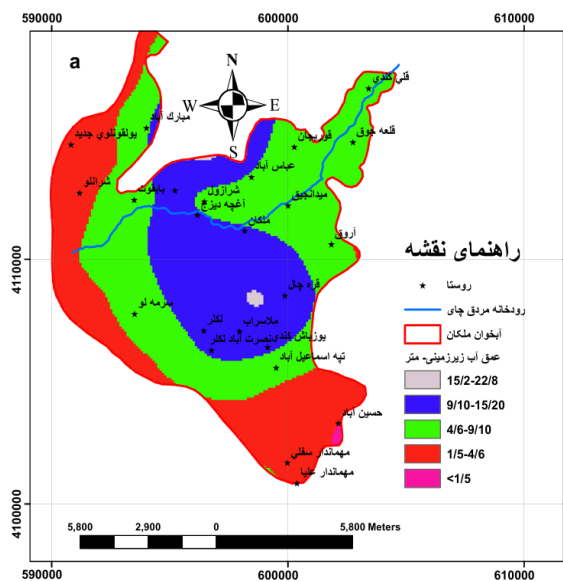
این ناحیه مواد غیراشباع روی لایه آبخوان را نشان می‌دهد و بر پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان تأثیر می‌گذارد و با افزایش اندازه ذرات، نفوذپذیری و ضخامت ناحیه غیراشباع، احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی افزایش می‌یابد. در محدوده مورد مطالعه اجزای تشکیل‌دهنده ناحیه غیراشباع از آنالیز ۲۶ لوگ چاه حفاری به دست آمده است و به لایه‌های نفوذپذیر رتبه‌های بالاتری نسبت داده شده است (جدول ۳).

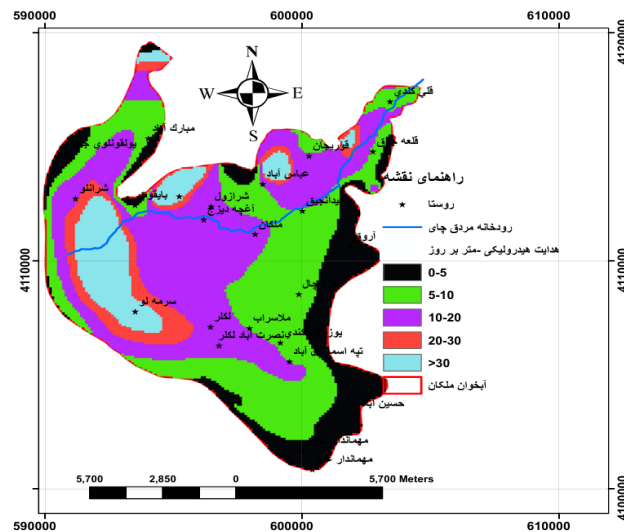
هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی توانایی حرکت سیال از طریق منافذ انواع خاک تعریف می‌شود. بین هدایت هیدرولیکی و پتانسیل آلودگی ارتباط مستقیم وجود دارد. در یک آبخوان با هدایت هیدرولیکی بالا جریان مواد آلاینده بیشتر است؛ بنابراین بر اساس پیشنهاد (Wei et al., 2021) نرخ ۱۰ به ناحیه با هدایت هیدرولیکی بیشتر از ۳۰ متر بر شبانه‌روز و نرخ ۱ به هدایت هیدرولیکی کمتر از ۵ متر در شبانه‌روز داده شده است. (جدول ۳). در این تحقیق نقشه هدایت هیدرولیکی از نقشه ضخامت آبخوان و نقشه ضریب قابلیت انتقال ارائه شده توسط سازمان آب با استفاده از نتایج داده‌های ژئوالکتریکی و بررسی‌های ژئوفیزیکی استخراج شده است. هدایت هیدرولیکی آبخوان در شمال و بخش مرکزی متمایل به شرق آبخوان بیش از سایر نقاط است.

در نهایت ترکیب هفت نقشه رستر فوق در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 مطابق رابطه ۲ و با استفاده از ابزار Raster calculator با بکارگیری تابع Lookup مطابق شکل ۴ صورت گرفته است.

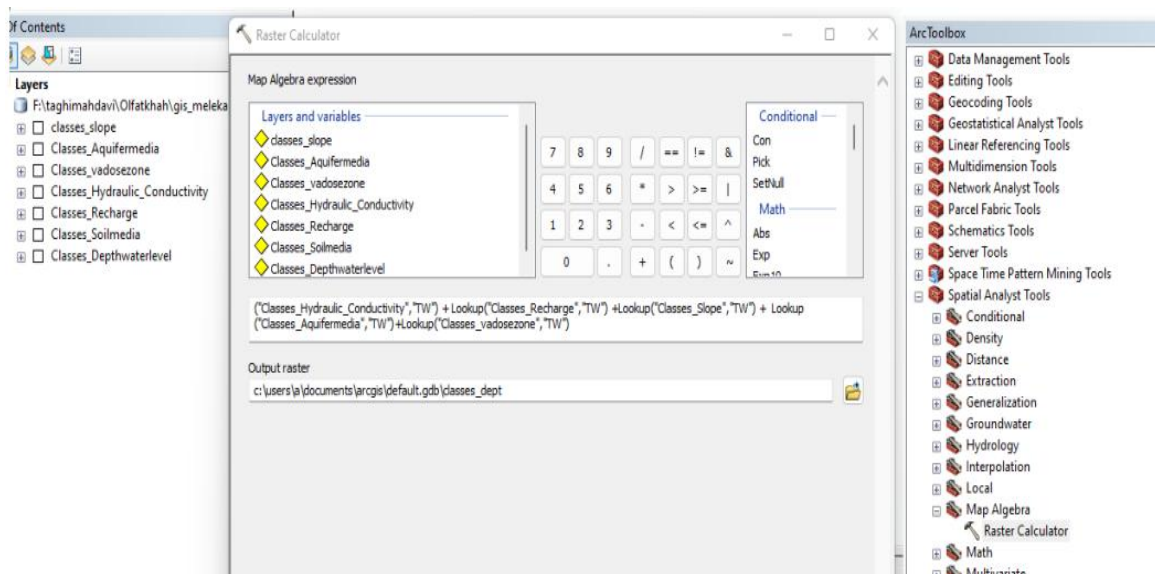
نقشه کلاسه‌بندی شده مدل DRASTIC مطابق پیشنهاد Wei et al. (2021) در جدول ۴ و در شکل ۵ ارائه شده است.





شکل ۳. تولید پارامترهای ورودی مدل DRASTIC (a- عمق سطح آب، b- تغذیه خالص، c- محیط آبخوان، d- محیط خاک، e- توپوگرافی (درصد شیب)، f- منطقه غیراشباع و g- هدایت هیدرولیکی)

Fig 3. DRASTIC model input parameters (a- depth of the groundwater b- Net recharge c- aquifer media d- soil media e- Slope f- vadose zone, g- Hydraulic conductivity)



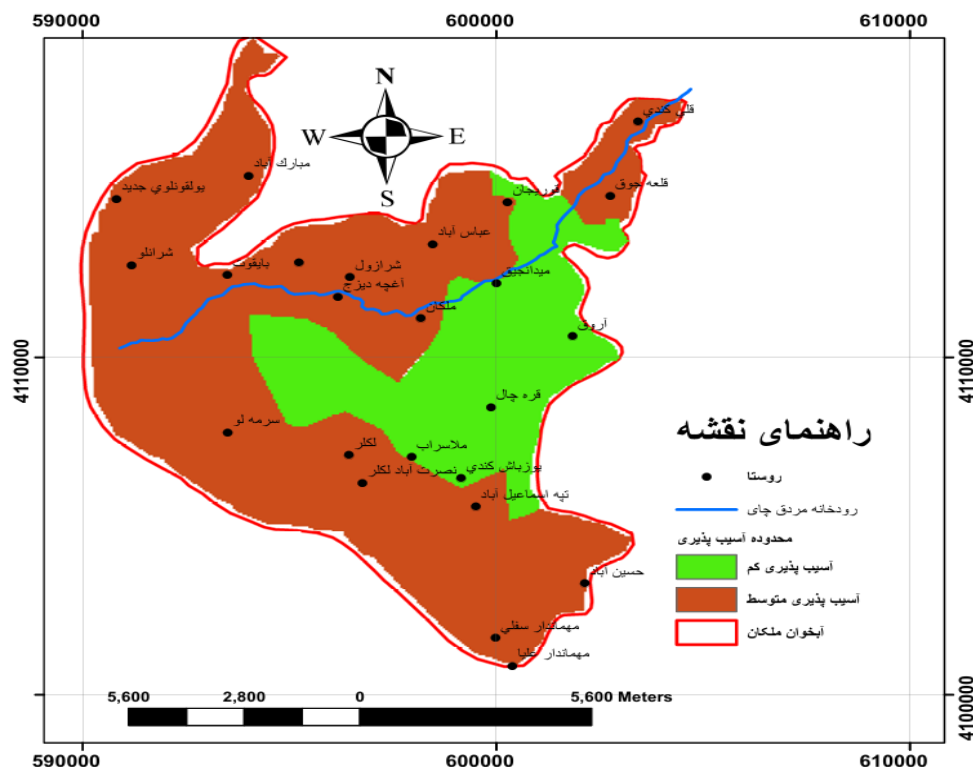
شکل ۴. ترکیب هفت نقشه رستر کلاسه‌بندی شده برحسب وزن کل (آنالیز همپوشانی در محیط ArcGIS)

Fig 4. Combination of seven raster maps (overlay analysis) in ArcGIS

جدول ۴. طبقه بندی میزان آسیب پذیری (Wei et al., 2021)

Table 4. Classification of the degree of vulnerability based on Wei et al. (2021)

	Subclasses				
	DRASTIC	49-84	84-109	109-138	138-185
Degree of vulnerability		very low	low	moderate	high



شکل ۵. مناطق آسیب‌پذیر آبخوان آبرفتی ملکان بر اساس مدل دراستیک
 Fig 5. Vulnerable areas of Malekan alluvial aquifer based on DRASTIC model

DRASTIC از روش مقایسه نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری با وقوع آلودگی واقعی استفاده شده است این روش انعطاف‌پذیر مستقل از روش‌های ارزیابی و شرایط هیدروژئولوژیکی است. به این منظور اندازه‌گیری غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی به‌عنوان شاخص آلودگی واقعی لحاظ شده است. غلظت نیترات می‌تواند نمایانگر ورود آلودگی از سطح زمین با عبور از لایه خاک و بخش غیراشباع در اثر نفوذ آب باشد و در اکثر تحقیقات به‌عنوان شاخص آلودگی در اعتبارسنجی ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده شده است (Wei et al., 2021; Boufekane et al., 2022; Huan et al., 2012). میزان آلودگی آب‌های زیرزمینی برحسب غلظت نیترات بر اساس توصیه (Jaunat et al., 2019) به‌صورت جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

بر اساس نقشه نهایی DRASTIC، ۲۷ درصد از منطقه مورد مطالعه به‌عنوان آسیب‌پذیر کم و ۷۳ درصد به‌عنوان آسیب‌پذیر متوسط طبقه‌بندی شده است. مناطق با آسیب‌پذیری متوسط از دو قسمت جداگانه تشکیل شده است. قسمت اول آن منطقه‌ای به مساحت ۵۰۳ کیلومترمربع از باغات روستاهای قلی‌کندی و قلعه جوق است. قسمت دوم منطقه‌ای به مساحت ۹۶ کیلومترمربع اراضی و باغات حدود ۱۷ روستا را شامل می‌شود که در سمت شرق آبخوان و به سمت جوار دریاچه ارومیه قرار دارند آسیب‌پذیری متوسط این قسمت در واقعیت به دلیل بالا بودن تراز سطح آب زیرزمینی است چون به سمت جوار دریاچه ارومیه سنگ‌های سخت زیر آبخوان به سطح زمین نزدیک است.

اعتبارسنجی مدل DRASTIC

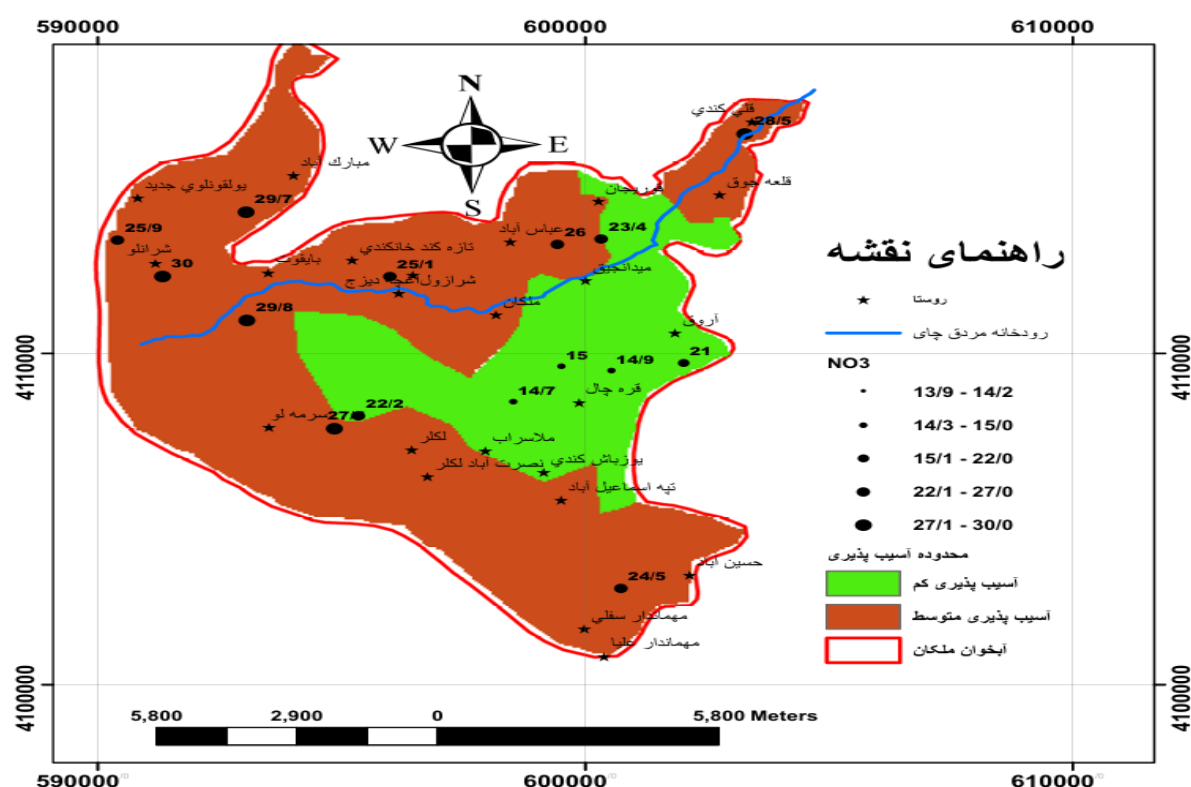
جهت بکارگیری مدل DRASTIC اعتبارسنجی آن ضروری است. در این تحقیق جهت اعتبارسنجی مدل

جدول ۵. درجه آلودگی آب های زیرزمینی بر اساس غلظت نیترات (Jaunat et al., 2019)

concentrations of NO ₃ -N in the groundwater mg/L	<5	5-15	15-30	30-50	> 50
Pollution degree	low	Relatively Low	medium	Relatively high	high

با غلظت نیترات با نقشه آسیب پذیری DRASTIC سازگار است. مشخص است که در کل منطقه غلظت نیترات کمتر از حداکثر مجاز آب آشامیدنی ۵۰ میلی گرم در لیتر (استاندارد ملی ایران ۱۰۵۳) می باشد و همه مقادیر نیترات اندازه گیری شده بسیار بالاتر از حد مطلوب ۵ میلی گرم در لیتر هستند. غلظت نیترات در آبخوان تا حد زیادی می تواند به فعالیت های انسانی/کشاورزی در گذشته و در حال حاضر نسبت داده شود چراکه هنوز هم شیوه های مؤثر و کارآمد مدیریت کاهش آلودگی سطح نیترات در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد.

در شکل ۶ غلظت نیترات اندازه گیری شده برای نمونه های آزمایشگاهی گرفته شده از آب های زیرزمینی در ۱۵ نقطه پراکنده در پاییز سال ۱۴۰۰ روی نقشه نهایی آسیب پذیری نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده میشود در محدوده خطرپذیری متوسط ده نقطه اندازه گیری نیترات وجود دارد که در تمام آن نقاط آن ها نیترات بالای ۱۵ میلی گرم در لیتر و زیر ۳۰ میلی گرم در لیتر می باشد و در محدوده خطرپذیری کم پنج نقطه اندازه گیری نیترات وجود دارد که سه مور آن ها نیترات زیر ۱۵ میلی گرم در لیتر دارند. نقشه خطر آلودگی

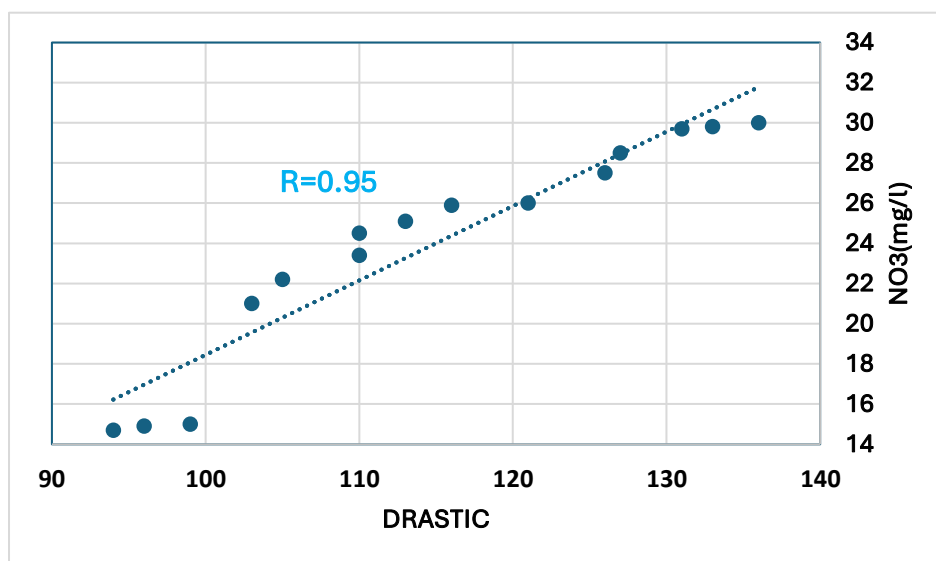


شکل ۶. غلظت نیترات اندازه گیری شده در ۱۵ نقطه پراکنده در پاییز سال ۱۴۰۰ روی نقشه نهایی آسیب پذیری

Fig 6. Nitrate concentration was measured at 15 scattered points in the fall of 2021 on the final vulnerability map.

در شکل شماره ۷ رابطه بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و غلظت NO_3 موجود در آب‌های زیرزمینی نشان داده شده و ضریب همبستگی پیرسون بین آن‌ها برابر $r=0.95$ محاسبه شده است.

در شکل شماره ۷ رابطه بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و غلظت NO_3 موجود در آب‌های زیرزمینی



شکل ۷. رابطه همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و غلظت NO_3

Fig 7. Correlation relationship between DRASTIC vulnerability index and NO_3 concentration

در این تحقیق از منحنی ROC ناپارامتری که روش تجربی نیز نامیده می‌شود استفاده شده است؛ چون در این روش تبعیت گروه داده‌ها از توزیع نرمال ضرورتی ندارد. به‌منظور ارزیابی نقشه آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده از مدل دراستیک با کنترل مواد آلاینده شاخص شیمیایی (نیترات) در جدول شماره ۶ مقادیر شاخص دراستیک به‌دست‌آمده و مقدار نیترات اندازه‌گیری شده در ۱۵ نقطه تصادفی آورده شده و remark شده است. درنهایت با توجه به نتایج جدول ۶ در شکل شماره ۸ منحنی ROC رسم شده است.

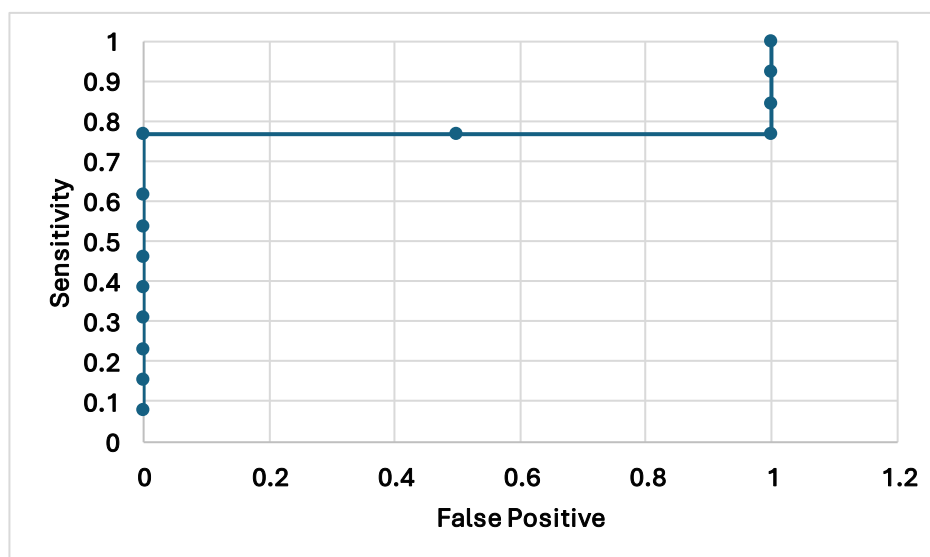
در ادامه در بخش بعدی برای استخراج دقت مدل DRASTIC تهیه شده، تکنیک ریاضی منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) به‌کاررفته است که اخیراً در تحقیقات اعتبارسنجی مدل DRASTIC توسط تعدادی از محققان استفاده شده است (Ghosh et al., 2021; Khosravi et al., 2021; Torkashvand et al., 2021; Nahm., 2022; Sarkar and Pal ., 2021).

مشخصه عملکرد گیرنده (ROC)

جدول شماره ۶. ارزیابی نقشه آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده از مدل دراستیک با کنترل مواد آلاینده شاخص شیمیایی (نیترات)
Table 6. Evaluation of the vulnerability map obtained from the drastic model with the control of chemical index pollutants (nitrate)

NO.	Latitude	Longitude	DRASTIC	Remark as: Aihua Wei (2021)	NO_3 (mg/l)	Remark as: Jaunat et al., (2019)	Agreement
1	598522	4108542	94	Low	14.7	Low	agree
2	600538	4109493	96	Low	14.9	Low	agree
3	599514	4109627	99	Low	15	Low	agree
4	602023	4109725	103	Low	21	Moderate	Disagree

5	595350	4108130	105	Low	22.2	Moderate	Disagree
6	600730	4102902	110	Moderate	23.4	Moderate	agree
7	600331	4113462	110	Moderate	24.5	Moderate	agree
8	595993	4112316	113	Moderate	25.1	Moderate	agree
9	590405	4113414	116	Moderate	25.9	Moderate	agree
10	599429	4113279	121	Moderate	26	Moderate	agree
11	594852	4107730	126	Moderate	27.5	Moderate	agree
12	603279	4116636	127	Moderate	28.5	Moderate	agree
13	593039	4114256	131	Moderate	29.7	Moderate	agree
14	593054	4110995	133	Moderate	29.8	Moderate	agree
15	591321	4112313	136	Moderate	30	Moderate	agree



شکل ۸. منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) برای اعتبارسنجی مدل DRASTIC

Fig 8. Receiver operating characteristic (ROC) curve for the validation of DRASTIC model

سطح زیر منحنی ارائه شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق سطح زیر منحنی نزدیک ۰/۸ می‌باشد لذا می‌توان گفت که مدل دراستیک تهیه شده از درجه اعتبار خوب برخوردار است.

برای معنی‌داری روش تشخیصی، AUC (سطح زیر منحنی ROC - Area Under Curve) باید بیشتر از ۰/۵ باشد و به‌طور کلی، باید بیشتر از ۰/۸ باشد تا قابل قبول در نظر گرفته شود. در جدول شماره ۷ بر اساس پیشنهاد Muller et al., (2005) تفسیر منحنی ROC، بر مبنای

جدول ۷. تفسیر مساحت زیر منحنی (Muller et al., 2005)

Table 6. Interpretation of the Area Under the Curve (Muller et al., 2005)

Area under the curve (AUC)	Interpretation
$AUC \geq 0.9$	Excellent
$0.8 \leq AUC < 0.9$	Good
$0.7 \leq AUC < 0.8$	Fair
$0.6 \leq AUC < 0.7$	Poor
$0.5 \leq AUC < 0.6$	Fail

نتیجه‌گیری

با توجه به ابعاد توسعه اجتماعی-اقتصادی در منطقه مورد مطالعه، آلودگی سریع آب‌های زیرزمینی موضوعی مهمی برای سیاست‌گذاران و مقامات محلی است. راه‌های زیادی برای استخراج مناطق مستعد آلوده شدن آب‌های زیرزمینی وجود دارد؛ اما کاربرد مدل DRASTIC نسبت به روش‌های کمی و کیفی دیگر کم‌هزینه‌تر است و می‌تواند حقیقت واقعی را به‌صورت نسبی نشان دهد. مدل DRASTIC یک مدل پرکاربرد است که از هفت پارامتر ورودی شامل عمق تا سطح آب، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی استفاده می‌کند. مدل DRASTIC به‌طور معمول برای بیش از ۲۰ سال برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی یک آبخوان استفاده شده است.

با این حال، این واقعیت که مدل DRASTIC معمولی اثرات شرایط هیدروژئولوژیکی محلی مانند فعالیت‌های کاربری موجود و آبی زمین را نادیده می‌گیرد، یک اشکال آشکار است. ممکن است برای ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مناسب نباشد. این محدودیت نشان می‌دهد که DRASTIC، در شکل معمول خود، می‌تواند با احتیاط هنگام ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی خاص و فعالیت‌های کاربری زمین مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین استفاده بالقوه از مدل‌های ترکیبی یا تکنیک‌های اعتبارسنجی اضافی می‌تواند قابل اعتمادتر باشد. ارزیابی در مقیاس منطقه‌ای آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از GIS و DRASTIC می‌تواند برای به‌تصویر کشیدن مناطقی که احتمال آلودگی دارند، استفاده شود. نقشه‌های شاخص آسیب‌پذیری نه به‌عنوان جایگزینی برای تجزیه و تحلیل دقیق محلی بلکه به‌عنوان ابزار غربالگری استفاده می‌شوند؛ چون تجزیه و تحلیل‌های دقیق محلی پرهزینه هستند، این ارزیابی‌ها می‌توانند برای شناسایی

مناطق مورد توجه و به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری در مورد نیاز به ارزیابی دقیق در چنین مناطق نگرانی استفاده شوند.

نتایج حاصل از به‌کارگیری این مدل در منطقه مورد مطالعه بسیار رضایت‌بخش بود؛ زیرا اعتبارسنجی آن با غلظت نیترات و منحنی مشخصه عملکرد گیرنده با سطح زیر منحنی نزدیک ۰/۸ مورد تأیید واقع شد و به‌درستی مناطق آسیب‌پذیر را نمایان کرد. این تحقیق مشابه تحقیق (Ghosh et al., 2021) نشان داد که مدل کلاسیک DRASTIC می‌تواند مناطق آسیب‌پذیر را شناسایی کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که یک منطقه آسیب‌پذیر متوسط کوچک به مساحت ۳۵ کیلومترمربع در بخش شمال غربی آبخوان آبرفتی وجود دارد که تحت شارژ زیاد ناشی از رودخانه مردق چای می‌باشد. یک منطقه آسیب‌پذیر نسبتاً بزرگ به مساحت ۹۵ کیلومترمربع در انتهای دشت وجود دارد که عمدتاً تحت عمق آب زیرزمینی کمتر هست. در این منطقه آسیب‌پذیر عمق آب زیرزمینی به دلیل وجود سنگ‌های نفوذناپذیر نزدیک به سطح زمین، کمتر است، بنابراین، آب‌های زیرزمینی بیشتر در معرض آلودگی قرار می‌گیرند. منطقه آسیب‌پذیر انتهایی دشت نزدیک به پهنه مسطح و کف تبخیری حاشیه دریاچه ارومیه است که پوشیده از رسوبات بسیار دانه‌ریز متراکم و پهنه نمکی است؛ بنابراین برای سالم‌تر کردن آب‌های زیرزمینی و پایداری آب‌های زیرزمینی و تأمین آب زیرزمینی سالم و بدون آلودگی برای مردم، دولت باید مراقبت ویژه‌ای از این مناطق داشته باشد. وجود مناطق آسیب‌پذیر متوسط در جوار شهرها و مناطق روستایی متراکم و پرجمعیت در صورت عدم تدبیر لازم، می‌تواند زنگ خطری برای توسعه پایدار در آینده باشد.

منابع

Agyare, A., Anornu, G. K., & Kabo-bah, A. T. (2017). Assessing the vulnerability of aquifer systems in the Volta River basin: a case study on

- Afram Plains, Ghana. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3, 1141-1159. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0363-3>
- Ahada, C. P., & Suthar, S. (2018). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Southern Punjab, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 635-645. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0449-6>
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., & Petty, R. (1986). DRASTIC: a system to evaluate the pollution potential of hydrogeologic settings by pesticides. <https://doi.org/10.1021/bk-1986-0315.ch008>
- Bakhtiarzadeh, A., Najafzadeh, M., and Mohamadi, S. (2023). 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. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2023.359513.1984>. [In Persian]
- Bahrami, E. and Shahidi, A. (2021). Improving DRASTIC Model by Planning Gene Expression in Determining Aquifer Vulnerability to Nitrate (Case Study: Kermanshah Plain). *Journal of Hydrogeomorphology*, 8(28), 39-62. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.44284.1574>
- Boskabadi, A., Bashi Azghadi, S. N., and Khamchin Moghaddam, F. (2023). Determining the vulnerability of the Khezri aquifer using the DRASTIC and GODS methods. *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(1), 151-168. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.6993.1056> [In Persian]
- Boufekane, A., Yahiaoui, S., Meddi, H., Meddi, M., & Busico, G. (2022). Modified DRASTIC index model for groundwater vulnerability mapping using geostatistic methods and GIS in the Mitidja plain area (Algeria). *Environmental Forensics*, 23(5-6), 539-556. <https://doi.org/10.1080/15275922.2021.1913674>
- Ebrahimi, S. H., Neshat, A., Javadi, S., and Aghmohamadi, H. (2018). Modification of DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability by Applying Two Approaches: Single Parameter Sensitivity Analysis (SPSA) and Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of Ecohydrology*, 5(4), 1191-1202. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.258954.897> [In Persian]
- Elmeknassi, M., El Mandour, A., Elgettafi, M., Himi, M., Tijani, R., El Khantouri, F. A., & Casas, A. (2021). A GIS-based approach for geospatial modeling of groundwater vulnerability and pollution risk mapping in Bou-Areg and Gareb aquifers, northeastern Morocco. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51612-51631. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14336-0>
- Farshi Baensaf, M. R., Rafati, M., and Kardan Moghaddam, H. (2025). Definition of the concept of exploitation risk in groundwater resources for calibrating aquifer vulnerability. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6(2), 237-256. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.10182.1129>
- Ghanbarian, M. and Ahmadi Nadoushan, M. (2019). Determination of aquifer vulnerability in the Lordegan aquifer using DRASTIC, AVI, and GODS Models. *Journal of Research in Environmental Health*, 4(4), 257-271. <https://doi.org/10.22038/jreh.2019.35710.1246>. [In Persian]
- Ghosh, R., Sutradhar, S., Mondal, P., & Das, N. (2021). Application of DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability: a study on Birbhum district, West Bengal, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1225-1239. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01047-7>
- Huan, H., Wang, J., & Teng, Y. (2012). Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: a case study in Jilin City of northeast China. *Science of the total environment*, 440, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.037>
- IPRC (Iranian Parliament Research Center). (2017). An analysis of Iran's water crisis and its impacts. Report No. 15608, Iran. Retrieved from <http://rc.majlis.ir/fa/report/show/1040201> [In Persian]
- Jaunat, J., Garel, E., Huneau, F., Erostate, M., Santoni, S., Robert, S.,... & Pasqualini, V. (2019). Combinations of geoenvironmental data underline coastal aquifer anthropogenic nitrate legacy through groundwater vulnerability mapping methods. *Science of the Total Environment*, 658, 1390-1403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.249>
- Jozi, S. A. and atae, S. (2018). Evaluating the environmental vulnerability of the groundwater of Hamedan's Dasht-e Bahar through DRASTIC, GODS, and AVI integrated methods. , 6(2), 65-82. <https://doi.org/10.22069/ejang.2019.8270.1233>. [In Persian]
- Khan, Q., Liaqat, M. U., & Mohamed, M. M. (2022). A comparative assessment of modeling groundwater vulnerability using the DRASTIC method from GIS and a novel classification method using machine learning classifiers. *Geocarto International*, 37(20), 5832-5850. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1923833>
- Khosravi, K., Sartaj, M., Karimi, M., Levison, J., & Lotfi, A. (2021). A GIS-based groundwater pollution potential using DRASTIC, modified DRASTIC, and bivariate statistical models. *Environmental Science and Pollution*

- Research*, 28(36), 50525-50541.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13706-y>
 Khosravi, K., Sartaj, M., Tsai, F. T. C., Singh, V. P., Kazakis, N., Melesse, A. M.,... & Pham, B. T. (2018). A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of the total environment*, 642, 1032-1049.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.130>
 Kozłowski, M., & Sojka, M. (2019). Applying a Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution: A Case Study in Central Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(3).
<https://doi.org/10.15244/pjes/86295>
 Lad S, Ayachit R, Kadam A, Umrikar B (2019) Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC model: a comparative analysis of conventional, AHP, Fuzzy logic, and Frequency ratio method. *Model Earth Syst Environ* 5:543–553.
<https://doi.org/10.1007/s40808-018-0545-7>
 Lall, U., Josset, L., & Russo, T. (2020). A snapshot of the world's groundwater challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 171-194.
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800>
 Liu, M., Xiao, C. & Liang, X. Assessment of groundwater vulnerability based on the modified DRASTIC model: a case study in Baicheng City, China. *Environ Earth Sci* 81, 230 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s12665-022-10350-8>
 Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S. J., & Bagheri, R. (2020). Delineating the source and mechanism of groundwater salinization in a crucial declining aquifer using multi-chemo-isotopes approaches. *Journal of Hydrology*, 586, 124877.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124877>
 Mohammaddost, A., Mohammadi, Z., Rezaei, M. et al. Assessment of groundwater vulnerability in an urban area: a comparative study based on DRASTIC, EBF, and LR models. *Environ Sci Pollut Res* 29, 72908–72928 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20767-0>
 Muller, M. P., Tomlinson, G., Marrie, T. J., Tang, P., McGeer, A., Low, D. E.,... & Gold, W. L. (2005). Can routine laboratory tests discriminate between severe acute respiratory syndrome and other causes of community-acquired pneumonia?. *Clinical infectious diseases*, 40(8), 1079-1086. <https://doi.org/10.1086/430111>
 Nahm, F. S. (2022). Receiver operating characteristic curve: overview and practical use for clinicians. *Korean journal of anesthesiology*, 75(1), 25-36. <https://doi.org/10.4097/kja.22014>
 Natarajan, P., Kottiswaran, S. V., Balasubramanian, A., & Palanikumar, B. (2018). Groundwater recharge estimation using comparison of methods in Sirumugai Area of Coimbatore, Tamil Nadu, India. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 7(06), 1433-1440.
<https://doi.org/10.22271/ijcmas.2018.v7.i6b.257>
 Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., & Sadegh, M., et al. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(25), e2024221118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2024221118>
 Norouzi Ghoshbelag, H., Asghari Moghaddam, A., and Hateftabar, S. (2019). Evaluation of Groundwater Vulnerability of Miandoab Plain to Nitrate Using Genetic Algorithm. *Journal of Environmental Studies*, 45(2), 301-315.
<https://doi.org/10.22059/jes.2019.279284.1007844>
 [In Persian]
 Pathak, S., Gupta, S., & Ojha, C. S. P. (2021). Assessment of groundwater vulnerability to contamination with ASSIGN index: a case study in Haridwar, Uttarakhand, India. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 25(2), 04020081.
[https://doi.org/full/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000594](https://doi.org/full/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000594)
 Rundquist, D. C., Peters, A. J., Di, L., Rodekohr, D. A., Ehrman, R. L., & Murray, G. (1991). Statewide groundwater-vulnerability assessment in Nebraska using the DRASTIC/GIS model. *Geocarto international*, 6(2), 51-58.
<https://doi.org/10.1080/10106049109354307>
 Sarkar, M., & Pal, S. C. (2021). Application of DRASTIC and modified DRASTIC models for modeling groundwater vulnerability of Malda District in West Bengal. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1201-1219.
<https://doi.org/10.1007/s12524-020-01176-7>
 Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863-1880.
<https://doi.org/10.1063/1.3186320>
 Taghavi, N., Niven, R. K., Paull, D. J., & Kramer, M. (2022). Groundwater vulnerability assessment: A review including new statistical and hybrid methods. *Science of the Total Environment*, 153486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153486>
 Tomer, T., Katyal, D., & Joshi, V. (2019). Sensitivity analysis of groundwater vulnerability using the DRASTIC method: a case study of the National Capital Territory, Delhi, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100271.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100271>
 Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., & Yousefi, H. (2021). DRASTIC framework improvement using stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) and a combination of genetic algorithm and entropy. *Environmental*

Science and Pollution Research, 28, 46704-46724.

<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11406-7>

Touzandejani, M., Pishjoo, A., Shoghi, A., Bashi Azghadi, S. N., and Azimi, R. (2023). Designing the quality monitoring network of groundwater resources based on the intrinsic vulnerability of the aquifer: A Case Study: Aquifer of Bolook Shera Study Area. *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(1), 138-150.

<https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7015.1057> [In Persian]

Valadi, G., Abbas Novinpour, E., Byzidi, M. (2024). The vulnerability assessment of Dehgolan aquifer groundwater using the drastic method and wavelet neural network, *Journal of New Findings in Applied Geology*, 18(35), 132-148.

<https://doi.org/10.22084/nfag.2023.27039.1535> [In Persian]

Wei, A., Bi, P., Guo, J., Lu, S., & Li, D. (2021). Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability to nitrate contamination in the Dagujia river basin, China. *Water Supply*, 21(4), 1793-1805.

<https://doi.org/21/4/1793/79888>

Yekom Consulting Engineers (2000), Malekan plain report, East Azarbaijan Regional Water

Zhan, Y., Guo, Z., Ruzzante, S., Gleeson, T., Andrews, C. B., Babovic, V., & Zheng, C. (2024). Assessment of spatiotemporal risks for nationwide groundwater nitrate contamination. *Science of The Total Environment*, 947, 174508.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174508>

