



## Assessment of groundwater vulnerability to pollution based on new hybrid approach methods

Aminreza Neshat<sup>1✉</sup> | Masoumeh Abed<sup>2</sup> | Mahdi Ramezani<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: [neshat.aminreza@srbiau.ac.ir](mailto:neshat.aminreza@srbiau.ac.ir)
2. Department of GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: [masoumeh.abed98@gmail.com](mailto:masoumeh.abed98@gmail.com)
3. Department of Environmental and Forest Sciences, Faculty of Natural Resource and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: [m\\_ramezani@srbiau.ac.ir](mailto:m_ramezani@srbiau.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 25 February 2024

Received in revised form

17 April 2024

Accepted 2 May 2024

Published online 5 September 2024

#### Keywords:

BWM

Entropy

Nitrate

SWARA

### ABSTRACT

The important issue regarding underground water resources is to know the extent of groundwater pollution, which leads to the management of areas prone to pollution. Groundwater vulnerability assessment can play a vital role in protecting, exploiting and prioritizing areas for controlling and using preventive plans. Due to the nature of the area, agricultural activities and nitrate increase, the DRASTIC method needs to be modified. The aim of the current research is to modify the weights of the DRASTIC model, which is considering the importance of modifying the ranking and the effect of weighting methods in the Yasouj aquifer. The frequency ratio framework was used to calibrate the DRASTIC index rates. Then, the weight correction of DRASTIC parameters was done in two stages of research, the first stage includes Shannon entropy and SPSA methods and the second stage includes BWM (Best Worst Method) and SWARA (Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis) methods. Therefore, nine frames including FR\_DRASTIC, DRASTIC\_Entropy, DRASTIC\_SPSA, DRASTIC\_SWARA, DRASTIC\_BWM, FR\_Entropy, FR\_SPSA, FR\_BWM, FR\_SWARA were obtained. The nitrate concentration of the well samples was used to validate the vulnerability indicators. Validation was done by ROC Curve method. FR\_SWARA performed better than other methods with the area under the curve of 0.80.

**Cite this article:** Neshat, A., Abed, M., & Ramezani, M. (2024). Assessment of groundwater vulnerability to pollution based on new hybrid approach methods. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 291-308.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.373115.1150>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.373115.1150>



## ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی براساس روش‌های جدید ترکیبی

امین‌رضا نشاط<sup>۱</sup> | معصومه عابد<sup>۲</sup> | مهدی رضائی<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [neshat.aminreza@srbiau.ac.ir](mailto:neshat.aminreza@srbiau.ac.ir)
۲. گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [masoumeh.abed98@gmail.com](mailto:masoumeh.abed98@gmail.com)
۳. گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: [m\\_ramezani@srbiau.ac.ir](mailto:m_ramezani@srbiau.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مسئله مهم در مورد منابع آب زیرزمینی، آگاهی از میزان آلودگی سفره آب زیرزمینی است که منجر به مدیریت مناطق مستعد آلودگی می‌شود. ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی می‌تواند نقشی حیاتی در حفاظت، بهره‌برداری و اولویت‌بندی مناطق جهت کنترل و استفاده از طرح‌های پیشگیرانه ایفا نماید. با توجه به ماهیت منطقه، فعالیت‌های کشاورزی و افزایش غلظت نیترات، روش DRASTIC نیاز به اصلاح دارد. هدف پژوهش حاضر اصلاح وزن‌های اولیه مدل DRASTIC است که با در نظر گرفتن اهمیت اصلاح رتبه‌بندی و تأثیر روش‌های وزن‌دهی در آبخوان یاسوج است. از چارچوب نسبت فرکانس برای کالیبره کردن نرخ‌های شاخص DRASTIC استفاده شد. در ادامه اصلاح وزن پارامترهای DRASTIC در دو مرحله پژوهش، که مرحله اول شامل روش‌های آنتروپی شانون و SPSA و مرحله دوم شامل روش‌های (BWM) بهترین-بدترین و تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA) است، انجام شد. بنابراین، نُه چارچوب شامل FR\_DRASTIC، FR\_Entropy، DRASTIC\_Entropy، DRASTIC\_SPSA، DRASTIC\_SWARA، DRASTIC\_BWM، DRASTIC\_Entropy، FR\_SPSA، FR\_BWM، FR\_SWARA به دست آمد. از غلظت نیترات نمونه چاه‌ها برای اعتبارسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری استفاده شد. اعتبارسنجی با روش ROC Curve انجام شد. FR\_SWARA با سطح زیر منحنی ۰/۸۰ عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشت.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵

کلیدواژه‌ها:

Nitrate

Entropy

BWM

SWARA

استناد: نشاط، امین‌رضا؛ عابد، معصومه و رضائی، مهدی (۱۴۰۳). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی براساس روش‌های جدید ترکیبی.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۳۰۸-۳۹۱. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.373115.1150>



## ۱. مقدمه

در بیش‌تر کشورهای آب‌های زیرزمینی یک منبع مهم و برجسته هستند، به‌ویژه کشورهایی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند در مدیریت آب‌های زیرزمینی، بر کیفیت آب تأکید بیش‌تری شده است (Li, et al., 2021; Manap et al., 2014; Neshat et al., 2014). در حال حاضر مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی به یک موضوع جهانی نگران‌کننده تبدیل شده است، زیرا توسعه سریع در صنعت و بخش‌های کشاورزی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و مقدار آن تأثیرگذار هستند (Ahmed, 2009; Jhariya, 2019). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر فعالیت‌های مخرب انسانی یک چالش بزرگ در هیدروژئولوژی کاربردی است (Gorelick and Zheng, 2015). بدین منظور ۱GVA برای حفاظت از آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی‌ها توسعه پیدا کرده است (Torkashvand et al., 2021; Kumar et al., 2015). احیای آب‌های زیرزمینی به کیفیت اصلی آن پس از آلوده‌شدن، بسیار دشوار و حتی گاهی غیرممکن می‌باشد (Expósito et al., 2010; Rezaei et al., 2013; Hao et al., 2017). بنابراین، پیشگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی امری ضروری است. طبق جدول (۲) پارامترهای DRASTIC با توجه به اهمیت نسبی آن‌ها در کمک به پتانسیل آلودگی از یک تا پنج وزن‌دهی می‌شوند (Aller et al., 1987). شاخص DRASTIC، متشکل از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی تأثیرگذار مستقل، برای ارزیابی آسیب‌پذیری سفره‌های زیرزمینی به‌صورت ذاتی استفاده می‌شود (Aminreza Neshat et al., 2014). تعدادی از پژوهش‌گران در نقاط مختلف جهان به بهبود چارچوب DARSTIC در رابطه با آلودگی موجود و با استفاده از انواع روش‌های آماری و ریاضی پرداخته‌اند (Li et al., 2021; Torkashvand et al., 2021; Shrestha & Luo, 2018; Busico et al., 2020).

نیترا به‌عنوان یک شاخص مناسب برای ارزیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود (Neshat and Pradhan, 2015). نیترا تماماً در آب محلول است و به‌عنوان یک آلاینده بسیار متحرک با منشأ انواع منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای عمل می‌کند (Iqbal et al., 2015; Neshat and Pradhan, 2015). از این‌رو، بسیاری از پژوهش‌گران از نیترا به‌عنوان شاخص کیفیت آب زیرزمینی برای بررسی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از سطح زمین استفاده کرده‌اند. سفره‌های آبی منابع مطمئن‌تری نسبت به آب‌های سطحی هستند. بنابراین شناسایی میزان آسیب‌پذیری و به‌دنبال آن مدیریت آن‌ها برای سال‌های خشکسالی ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مطالعه سعی بر آن است که به‌کمک روش‌های آماری به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان یاسوج پرداخته شود. شهر یاسوج که در جنوب‌غربی ایران واقع است در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و به‌دنبال آن با رشد فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی روبه‌رو بوده است. سفره آب یاسوج به‌عنوان منبع حیاتی آب مصرفی در منطقه، با بهره‌برداری بی‌رویه در معرض آسیب‌پذیری بیش‌تری قرار دارد. بنابراین ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری آب زیرزمینی سفره آب یاسوج گامی اساسی برای مدیریت و حفاظت از آب آشامیدنی منطقه است. با توجه به مطالعاتی که در گذشته انجام شده و در دسترس بودن داده‌ها، چارچوب DRASTIC با ترکیب رویکردهای آماری قدرتمند با در نظر گرفتن غلظت نیترا در منطقه مورد مطالعه فعلی، اعمال و بهبود می‌یابد. استفاده از رویکردهای جدید برای تغییرات مدل، عملکرد بهتری نسبت به روش‌هایی که فقط رتبه‌بندی یا وزن‌دهی را انجام می‌دهند، دارد. مجموعه‌های نسبت فراوانی، آنتروپی، تجزیه و تحلیل حساسیت تک‌پارامتری (SPSA) ۲ توسط Torkashvand et al. (2023) توسعه پیدا کرد.

در مطالعه حاضر از روش‌های نسبت فراوانی، تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA) ۳ و روش بهترین-بدترین (BWM) ۴ برای بهبود عملکرد چارچوب اصلی DRASTIC استفاده شده است. FR برای اصلاح نرخ‌های DRASTIC به‌عنوان یک مدل آماری مبتنی بر احتمالات استفاده می‌شود. مطالعه انجام‌شده نشان داد که روش SWARA عملکرد بهتری نسبت به روش BWM دارد. مراحل انجام کار براساس شکل (۱) انجام شد.

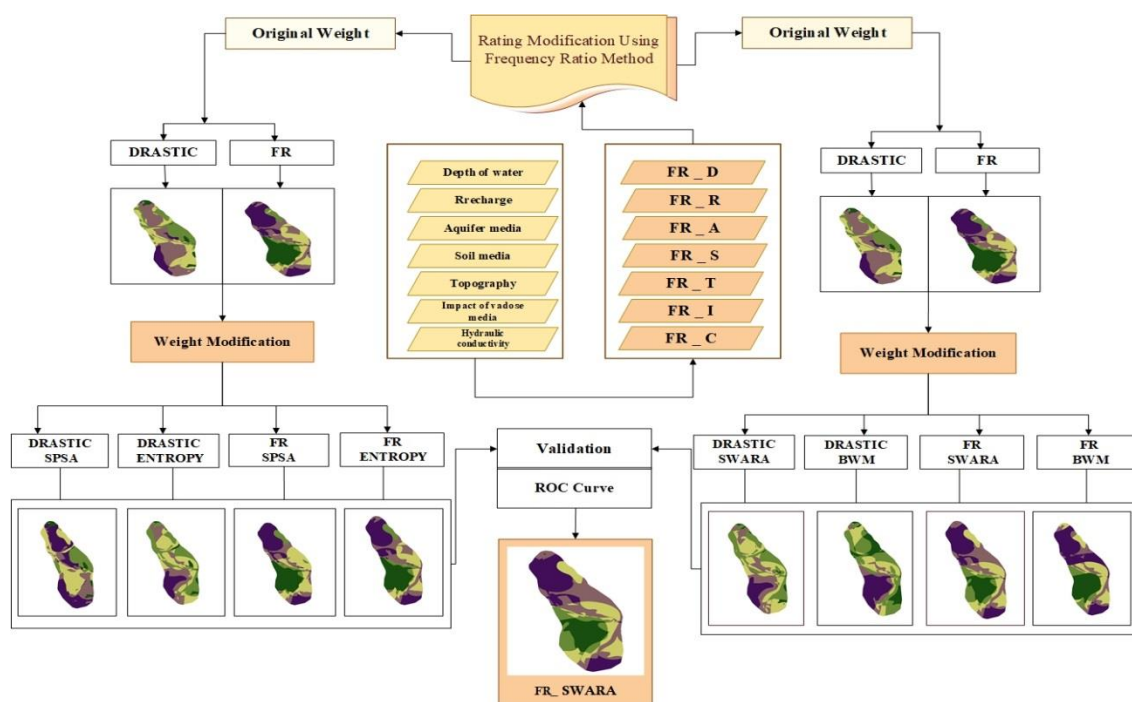


Figure 1. Flowchart of the study

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

دشت یاسوج در جنوب غربی ایران واقع شده است و تقریباً بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی تا ۳۰ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۲). اگرچه رشته کوه زاگرس یاسوج را احاطه کرده است، اما توپوگرافی منطقه مورد مطالعه بسیار ملایم و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۸۶۰ متر است. براساس گزارش سازمان هواشناسی کشور، میانگین دمای سالانه منطقه مورد مطالعه ۱۵/۳۰ درجه سانتی‌گراد و مجموع بارندگی سالانه ۸۲۰ میلی‌متر برآورد شده است. آبخوان یاسوج به‌عنوان برجسته‌ترین آبخوان منطقه ۹۲ کیلومترمربع وسعت دارد. با توجه به رطوبت زیاد و وزش بادهای مرطوب در منطقه مورد مطالعه، میزان بارندگی، بیش‌تر از میانگین بارندگی ایران (۲۸۰ میلی‌متر) است که باعث ایجاد رودخانه‌ها می‌شود. رودخانه بشار به‌عنوان مهم‌ترین رودخانه منطقه مورد مطالعه یکی از جریان‌های اصلی ورودی رودخانه کارون است. براساس اعلام سازمان آب کهگیلویه و بویراحمد ۲۱۵ حلقه چاه بهره‌برداری در حوزه آبخوان یاسوج وجود دارد. با وجود چشمه‌ها و رودخانه‌های فراوان در اطراف یاسوج، به‌دلیل رشد جمعیت و توسعه شهری، این منابع بخش زیادی از آب شرب شهر یاسوج و روستاهای حومه شهر را تشکیل می‌دهند.

شکل کنونی منطقه مورد مطالعه ناشی از فعالیت کوه‌زایی در اواخر قرن سوم و کاهش تدریجی تراکم تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها در جهت شمال غربی- جنوب غربی است. در دشت یاسوج، بستر آبخوان به‌طور عمده از ماسه سنگ و بازالت عظیم تشکیل شده است که به‌دلیل نفوذپذیری بالا، خطر نفوذ نیترات را افزایش می‌دهد. در نتیجه فعالیت‌های کشاورزی و استفاده گسترده از کودها، باعث افزایش قابل توجه غلظت نیترات در سراسر منطقه مورد مطالعه شده است. به‌تازگی رشد جمعیت باعث گسترش فعالیت‌های کشاورزی در دشت یاسوج شده است و استفاده گسترده از کودها نیترات را به سطح

زمین وارد می کند. در مطالعه حاضر توزیع نیترات با استفاده از الگوریتم درون یابی کریجینگ معمولی براساس نمونه های آموزشی به دست آمده است.

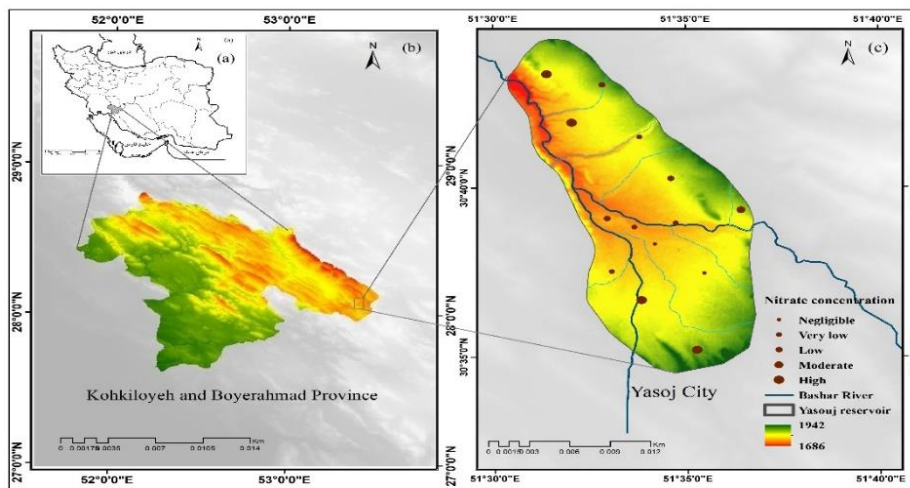


Figure 2. Location of the study area and sampling points

## ۲.۲ روش ها

### شاخص DRASTIC

روش DRASTIC یک چارچوب ساده است و به طور کلی، در جایی که داده های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی در دسترس باشد، قابل استفاده است. منابع داده های مورد استفاده برای تولید پارامترهای این روش در جدول (۱) ارائه شده است. پارامترهای روش شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه غیراشباع (I)، و هدایت هیدرولیک (C) هفت پارامتر هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی هستند که بر حرکت آب زیرزمینی و فرایندهای آلودگی تأثیر می گذارند (Aller *et al.*, 1987) معیارها از "یک" تا "۱۰" طبقه بندی و رتبه بندی می شوند و همچنین با توجه به سهم نسبی آن ها در آلودگی ذاتی از "یک" تا "پنج" وزن دهی می شوند. شاخص DRASTIC با استفاده از ترکیب خطی همه عوامل مطابق با رابطه (۱) ارزیابی می شود.

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (\text{رابطه } 1)$$

DI شاخص DRASTIC و زیرنویس های "r" و "w" به ترتیب مربوط به نرخ ها و وزن های DRASTIC هستند. اگرچه آبخوان مورد مطالعه شامل شن و ماسه، آذرین دگرگونی و آذرین دگرگونی هوازده است که با نفوذپذیری نسبتاً ناچیز از برخی از قسمت های آب های زیرزمینی در برابر آلودگی محافظت می کند. وجود ماسه و خاک رس با پتانسیل شست و شوی بالا علاوه بر میزان تغذیه تأثیر معنی داری بر آسیب پذیری ذاتی منطقه مورد مطالعه داشت.

### لایه های روش DRASTIC

داده های مورد نیاز برای به دست آوردن پارامترهای هیدروژئولوژیکی مدل DRASTIC در جدول (۲) آمده است و لایه های رستری مربوط به هفت معیار DRASTIC در GIS تهیه شده است. عمق آب زیرزمینی که نشان دهنده فاصله عمودی سطح زمین و سطح آب زیرزمینی است به پنج طبقه با کمترین مقدار ۴/۵ متر در جنوب غربی آبخوان تقسیم شد. تغذیه

خالص از داده‌های بارندگی و رواناب در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن نفوذپذیری و توپوگرافی به دست می‌آید. در دشت یاسوج نقشه تغذیه خالص به سه کلاس، طبقه‌بندی می‌شود که بیش‌ترین میزان آن مربوط به قسمت غربی آبخوان است. محیط آبخوان تخلخل، اندازه دانه و نفوذپذیری را مورد بحث قرار می‌دهد. قسمت شمالی آبخوان با شن و ماسه با بیش‌ترین نفوذپذیری ساخته شده است. خاک تأثیر قابل توجهی بر توانایی یک آلاینده برای حرکت به صورت عمودی در ناحیه غیراشباع دارد. توپوگرافی که بر میزان نفوذ تأثیر می‌گذارد، از مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) تولید و براساس نظریه Aller *et al.* (1987) به پنج کلاس تقسیم شد. شیب ملایم زمین با افزایش زمان باقی‌ماندن آلودگی در سطح، احتمال افزایش نفوذ آلودگی و به دنبال آن افزایش پتانسیل آلودگی را در پی دارد. در آبخوان یاسوج، ناحیه غیراشباع دارای ماهیتی یکنواخت با بسترهای شن و ماسه در سراسر منطقه مورد مطالعه است. هدایت هیدرولیکی نقش اساسی در سرعت مهاجرت آلاینده‌ها از طریق آبخوان دارد. در این پژوهش نقشه توزیع هدایت هیدرولیکی تهیه و در پنج گروه طبقه‌بندی شد.

Table 1. Sources of data used for producing the parameters of the DRASTIC method

منابع	نوع داده	منابع	نوع داده
سازمان آب شهرستان کهگیلویه	هدایت هیدرولیکی	سازمان هواشناسی کهگیلویه	داده‌های هیدروژئولوژیکی
سازمان آب شهرستان کهگیلویه	مشخصات زمین شناسی	سازمان زمین شناسی ایران	نقشه زمین شناسی
سازمان آب شهرستان کهگیلویه	تبادل بخشی آب زیرزمینی	پژوهشکده خاک و آب کهگیلویه	نقشه خاک
با استفاده از تکنیک GSP	چاه‌های نمونه	سازمان آب شهرستان کهگیلویه	توپوگرافی

### روش نسبت فراوانی (FR)

مدل FR می‌تواند همبستگی بین توزیع نمونه‌های نیترات و هر یک از هفت پارامتر DRASTIC را تعیین کند (Neshat and Pradhan, 2015; Bordbar *et al.*, 2021). برای محاسبه نسبت فراوانی، نیاز است نسبت مساحت برای وقوع آلودگی و عدم وقوع آن برای کلاس یا نوع هر عامل محاسبه شود. در تعیین نسبت فراوانی، نسبت غلظت نیترات برای محدوده هر پارامتر DRASTIC با در نظر گرفتن غلظت کل نیترات مشاهده شده در هر کلاس از هر پارامتر از نمونه‌های نیترات درون‌یابی شده در مقایسه با غلظت کل نیترات در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. در نهایت، FRها برای هر محدوده فاکتور با تقسیم نسبت غلظت نیترات بر نسبت سطح به دست آمده، به دست آمد. مقدار FR در هر کلاس از ضریب آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را می‌توان براساس رابطه (۲) بیان کرد.

$$FR = \frac{A/B}{C/D} = E/F \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، "A" مساحت یک کلاس برای هر عامل DRASTIC است. "B" مساحت کل هر عامل است. "C" مجموع غلظت نیترات رخ داده در کلاس هر عامل است. "D" کل غلظت نیترات در منطقه مورد مطالعه است. "E" درصد نیترات در کلاس هر عامل است. "F" درصد مساحت در کلاس هر عامل است. با توجه به تعریف نسبت فراوانی، می‌توانیم مقدار یک را به عنوان یک مقدار متوسط در نظر بگیریم. مقدار بیش‌تر از یک همبستگی بالاتری را بین فاکتور مربوطه و غلظت نیترات نشان می‌دهد. از سوی دیگر، مقدار کم‌تر از یک به یک همبستگی کم‌تر اشاره دارد (Manap *et al.*, 2014; Pradhan and Lee, 2010). حداکثر مقدار نرخ DRASTIC اولیه محدوده هر پارامتر در منطقه مورد مطالعه به حداکثر مقدار FR به عنوان نرخ اصلاح شده آن اختصاص داده شد. سپس نسبتی برای محاسبه نرخ‌های تعدیل شده سایر محدوده‌های پارامتر DRASTIC براساس مقادیر FR و حداکثر نرخ اعمال شد (شکل ۳).

## روش آنتروپی

طرح وزن‌دهی اصلاح‌شده ممکن است برای به حداقل رساندن تأثیر قضاوت ذهنی انسان مورد استفاده قرار گیرد (Yu et al., 2012)، اصل آنتروپی می‌تواند با محاسبات بهینه‌سازی کارآمد باشد. به عبارت دیگر، آنتروپی اندازه‌گیری عدم قطعیت در سیستم است. مقدار آنتروپی کم‌تر در داده‌ها نشان می‌دهد که نتایج غیرمنتظره کم‌تر است و مقدار آنتروپی بیش‌تر به معنای عدم قطعیت بیش‌تری در ارتباط با داده‌هاست (Chen et al., 2017).

## روش تحلیل حساسیت تک پارامتری (SPSA)

روش تحلیل حساسیت تک پارامتری تجزیه و تحلیل «وزن مؤثر» هر پارامتر را در مقایسه با «وزن‌های نظری» آن‌هاست که توسط مدل DRASTIC تخصیص داده شده است و تأثیرگذارترین پارامترها را نشان می‌دهد (Brindha and Elango, 2015).

## اعتبارسنجی

نیترا یک آلاینده شناخته شده است که آب‌های زیرزمینی را در مناطق کشاورزی تهدید می‌کند، که به‌طور عمده منشأ آن از سطح زمین است و به دلیل استفاده از کودها در مناطق تغذیه طبیعی رخ می‌دهد (Chen et al., 2017). غلظت نیترا در ۱۴ چاه در منطقه مورد مطالعه در بررسی دوم اندازه‌گیری شد تا یک مجموعه داده آزمایشی تشکیل شود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی عملکرد مدل سازی فضایی، منحنی ROC است (Paryani et al., 2021; Islam et al., 2022). متدهای انجام‌شده در پژوهش حاضر از طریق منحنی ROC اعتبارسنجی شدند.

## ۳. یافته‌ها

### نقشه DRASTIC

طبقه‌بندی هفت پارامتر از جمله نرخ نسبی و وزن معیارها براساس روش آلر در مطالعه موردی حاضر در جدول (۳) نشان داده شده است. هفت لایه DRASTIC پس از طبقه‌بندی مجدد با استفاده از سیستم رتبه‌بندی اصلی انجام شد. براساس نقشه عمق، عمق تا سطح ایستابی در دشت یاسوج از جنوب‌غربی به شرق به تدریج در حال افزایش است. هم‌چنین بیش‌ترین میزان تغذیه خالص در قسمت جنوبی آبخوان یاسوج با نرخ بالای شش اندازه‌گیری می‌شود. بیش‌تر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه دارای توپوگرافی بسیار صافی هستند و رتبه‌های ۱ و ۱۰ را به خود اختصاص داده‌اند. ناحیه وادوز شامل شن و ماسه در سراسر منطقه مورد مطالعه است، بنابراین یک طبقه با رتبه‌بندی هشت وجود دارد. شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC با ضرب نرخ و وزن‌های اصلی هفت عامل که در رابطه (۱) معرفی شده است، محاسبه شد. نقشه به‌دست‌آمده براساس روش طبقه‌بندی طبیعی (Jenks, 1977) از خیلی کم تا خیلی زیاد با دامنه ۷۹ تا ۱۸۶ طبقه‌بندی شده است. براساس این طبقه‌بندی، جنوب‌غربی منطقه مورد مطالعه بیش‌ترین آسیب‌پذیری را با ارزش ۱۵۲ تا ۱۸۶ دارد، درحالی‌که کلاس آسیب‌پذیری بسیار کم متعلق به شمال و بخش‌های کوچک جنوب‌شرقی با ارزش ۷۹ تا ۱۰۳ است.

### نقشه FR-DRASTIC

نسبت فراوانی دامنه هر پارامتر DRASTIC از رابطه (۲) در رابطه با توزیع نیترا در منطقه مورد مطالعه از نمونه‌های آموزشی به‌دست آمد. جدول (۳) مقادیر FR و نرخ‌های اصلاح‌شده را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در مورد محیط

غیر اشباع، منطقه مورد مطالعه به یک کلاس طبقه‌بندی شده است و FR مقدار یک را به دست آورد که مقدار متوسط است و رتبه هشت به آن اختصاص داده شد. نقشه آسیب‌پذیری آبخوان یاسوج از شاخص FR-DRASTIC با ترکیب خطی نرخ FR و وزن DRASTIC هفت پارامتر به دست آمد (شکل ۵-ب). همان‌طور که نقشه بیان می‌کند، آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه به پنج کلاس از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شد که محدوده مقدار شاخص بین ۱۲۶/۶ تا ۱۸۱/۹ است. کم‌ترین میزان آسیب‌پذیری مربوط به جنوب‌غربی آبخوان است، در حالی که شمال و بخش کوچکی از جنوب آسیب‌پذیری آلودگی بسیار بالایی را نشان می‌دهند.

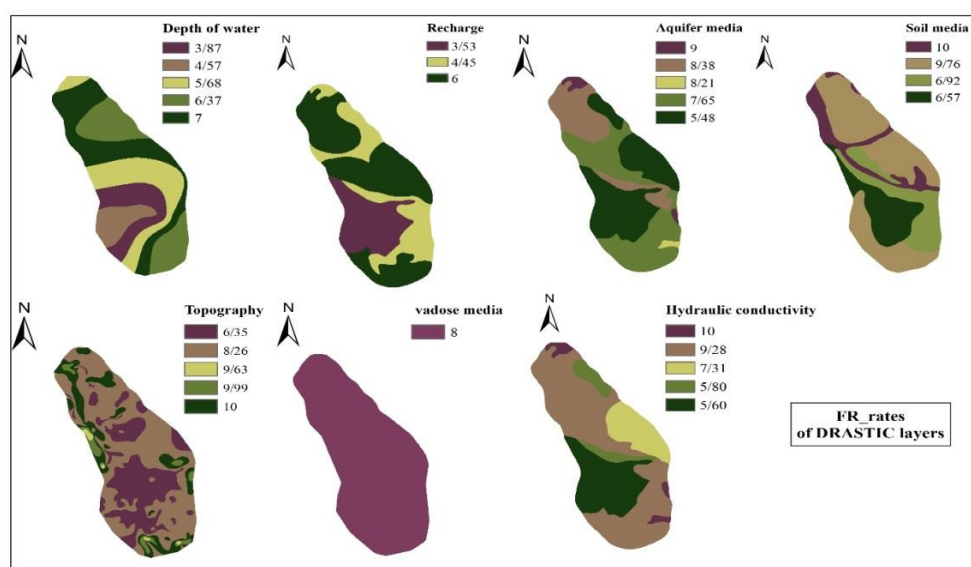


Figure 3. Seven layers of the modified DRASTIC ratings using FR approach

Table 2. The ranges of DRASTIC parameters in the study area based on Aller *et al.* (1987)

Parameter	Range	DRASTIC rate	DRASTIC weight
Depth of water (m)	>30	1	5
	23-30	2	
	15-23	3	
	9-15	5	
	4.5-9	7	
Net recharge (cm/year)	0-5	1	4
	5-10	3	
	10-18	6	
Aquifer media	Metamorphic igneous	3	3
	Weathered metamorphic igneous	4	
	Massive sandstone	6	
	Gravel & sand	8	
	Basalt	9	
Soil media	Clay	1	2
	Clay loam	3	
	Loam	5	
	Sand	10	
Topography (%)	>18	1	1
	12-18	3	
	6-12	5	
	2-6	9	
	0-2	10	
Impact of vadose media	Gravel & sand	8	5
Hydraulic conductivity (m/day)	0.05-5	1	3
	5-15	2	
	35-50	6	
	50-100	8	
	>100	10	



Table 3. Modified and original rate values for each DRASTIC layer based on FR method

Parameter	Range	Rating	DRASTIC Weight	% of total area (a)	% of nitrate (b)	Frequency ratio (b/a)	Modified rating
Depth of water (m)	>30	1		22.07	24.05	1.09	6.37
	23-30	2		29.66	35.49	1.2	7
	15-23	3	5	24.01	23.3	0.97	5.68
	9-15	5		15	9.93	0.66	3.87
	4.5-9	7		9.26	7.24	0.77	4.57
Net recharge (cm/year)	0-5	1		26.46	23.47	0.89	4.45
	5-10	3	4	50.37	60.21	1.2	6
	10-18	6		23.17	16.32	0.7	3.53
Aquifer media	Metamorphic igneous	3		0.81	0.95	1.17	8.21
	Weathered metamorphic igneous	4		2.04	2.63	1.29	9
	Massive sandstone	6	3	39.46	30.93	0.78	5.48
	Gravel & sand	8		22.05	26.44	1.2	8.38
	Basalt	9		35.64	39.04	1.1	7.65
Soil media	Clay	1		12.89	14.87	1.15	10
	Clay loam	3	2	17.91	13.57	0.76	6.57
	Loam	5		19.41	15.49	0.8	6.92
	Sand	10		49.79	56.07	1.13	9.77
Topography [Slope] (%)	>18	1		0.63	0.76	1.2	9.63
	12-18	3		3.18	3.97	1.25	9.99
	6-12	5	1	13.51	16.89	1.25	10
	2-6	9		53.45	55.2	1.03	8.27
	0-2	10		29.23	23.19	0.79	6.35
Impact of vadose media	Gravel & sand	8	5	100	100	1	8
Hydraulic conductivity (m/day)	0.05-5	1		2.85	3.58	1.26	10
	5-15	2		12.71	11.67	0.92	7.31
	35-50	6	3	22.94	16.13	0.7	5.6
	50-100	8		6.97	5.08	0.73	5.8
	>100	10		54.52	63.54	1.17	9.28

نقشه DRASTIC\_Entropy وزن‌ها به روش آنتروپی کالیبره شدند. با توجه به قانون "مقدار آنتروپی بیشتر، عدم قطعیت بیشتر"، تأثیر رسانه‌های وادوزی با بالاترین آنتروپی از اصلاح حذف شد. جدول (۴) وزن‌های بهینه‌شده هر پارامتر شاخص آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. مقدار DRASTIC محاسبه‌شده براساس روش DRASTIC-Entropy بین ۱/۴ و ۷/۶ بوده و در پنج کلاس طبقه‌بندی شده است.

Table 4. Modified weights of DRASTIC parameters based on Entropy method

Parameters	Entropy	Entropy weight	Modified weight
Depth of water	0.978	0.269	0.392
Net recharge	0.979	0.247	0.288
Aquifer media	0.997	0.031	0.027
Soil media	0.978	0.260	0.152
Topography	0.996	0.047	0.014
Impact of vadose media	1	0	0
Hydraulic conductivity	0.988	0.146	0.128

#### نقشه DRASTIC-SPSA

جدول (۵) وزن مؤثر به‌دست‌آمده از SPSA را براساس رتبه‌بندی اصلی DRASTIC نشان می‌دهد. وزن مؤثر کم از توپوگرافی کم‌ترین وزن نظری شیب را تأیید کرد. در مقایسه با وزن‌های نظری تعیین‌شده توسط چارچوب DRASTIC، شارژ خالص، محیط آبخوان، اثر محیط‌های وادوزی و هدایت هیدرولیکی وزن‌های مؤثر بالاتری داشتند. شاخص آسیب‌پذیری از رویکرد DRASTIC-SPSA بین ۹۳/۹۵ و ۱۹۶/۲۳ به‌دست‌آمده و در پنج کلاس طبقه‌بندی شده است.

Table 5. Modified weights of DRASTIC parameters based on SPSA method

Parameters	Theoretical weight (%)	DRASTIC weight	Modified			
			weight	Min%	Max%	Mean%
Depth of water	21.74	5	2.48	3.41	28.46	10.77
Net recharge	17.39	4	2.15	2.41	19.67	9.36
Aquifer media	13.04	3	3.83	8.11	23.08	16.64
Soil media	8.70	2	2.26	1.46	20.83	9.82
Topography	4.35	1	1.47	0.69	11.49	6.39
Impact of vadose media	21.74	5	6.95	23.12	50.00	30.21
Hydraulic conductivity	13.04	3	3.87	2.44	25.46	16.81

## روش DRASTIC\_SWARA

وزن‌ها در روش SWARA براساس نظر متخصصان و کارشناسان مشخص می‌شود به این ترتیب که بالاترین رتبه به مهم‌ترین معیار و کم‌ترین رتبه به کم‌اهمیت‌ترین معیار اختصاص داده می‌شود (Shakeri et al., 2023). روش SWARA دارای مزایای واقعی نسبت به سایر روش‌های MADM مشابه مانند AHP و ANP است. در فرایند SWARA، وزن ویژگی‌ها براساس اولویت‌های قبلی که با توجه به وضعیت مشخص شده‌اند، ارزیابی می‌شوند (Hashemkhani Zolfani et al., 2018) در پژوهش حاضر برای رتبه‌بندی اولیه معیارها از نقطه نظرات کارشناسان استفاده شد و بدین ترتیب مقادیر  $S_j$  به‌دست آمد. عمق آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین معیار به تکنیک SWARA معرفی شد و بقیه معیارها باید به‌ترتیب اهمیت هریک امتیازدهی شوند مراحل روش به‌ترتیب زیر است (Shakeri et al., 2023).

۱. انتخاب معیارهای موردنیاز و رتبه‌بندی آن‌ها با توجه به درجه اهمیت آن‌ها (به‌طوری که باید برای مهم‌ترین معیار، بالاترین رتبه و برای کم‌اهمیت‌ترین معیار پایین‌ترین جایگاه را در نظر گرفت).

$$S_j = \frac{\sum_i A_i}{n} \quad \text{رابطه ۳}$$

۲. محاسبه ضریب  $K_j$  که تابعی از اهمیت نسبی هر معیار است.

$$K_j = S_j + 1 \quad \text{رابطه ۴}$$

۳. تعیین وزن اولیه هر معیار

$$Q_j = \frac{X_j - 1}{K_j} \quad \text{رابطه ۵}$$

۴. محاسبه وزن نهایی و نرمال کردن معیارها

$$W_j = Q_j / \sum_{j=1}^m Q_j \quad \text{رابطه ۶}$$

در جدول (۶) مراحل انجام این روش ارائه شده است. وزن‌های اصلاح‌شده DRASTIC-SWARA از مقادیر  $W_j$  و وزن‌های اصلی روش درستیک حاصل شد در ادامه نقشه آسیب‌پذیری نواحی مختلف آبخوان تهیه و طبقه‌بندی از بسیار کم تا بسیار زیاد انجام شد. شاخص آسیب‌پذیری از ۳/۴۸ تا ۱۸۶ طبقه‌بندی شد (شکل ۵-۵).

Table 6. Modified weights of DRASTIC parameters based on SWARA method

Parameters	$S_j$	$K_j$	$Q_j$	$W_j$	DRASTIC weight	Modified weight
Depth of water	0	1	1	0.18	5	0.26
Net recharge	0.05	1.05	0.95	0.17	4	0.2
Impact of vadose media	0.05	1.05	0.91	0.16	5	0.24
Soil media	0.1	1.1	0.82	0.15	2	0.09
Topography	0.1	1.1	0.75	0.14	1	0.04
Aquifer media	0.37	1.37	0.55	0.1	3	0.09
Hydraulic conductivity	0.03	1.03	0.53	0.1	3	0.08

روش بهترین-بدترین (BWM): BWM از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که از جدیدترین و کاراترین

روش‌ها به حساب می‌آید. این روش برای اولین بار توسط آقای دکتر جعفر رضایی در سال ۲۰۱۵ ارائه شد. هدف این روش محاسبه وزن معیارهای پژوهش می‌باشد که از نظرات متخصصان در تخمین اوزان استفاده می‌شود (Rezaei et al., 2013). سازگاری و قابلیت اطمینان وزن‌ها، تعداد مقایسات زوجی کمتر نسبت به روش‌هایی مانند AHP، این روش را به روشی قدرتمند تبدیل کرده است. این تکنیک برای حل مسائل با چندین پارامتر بسیار مفید است و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Ahmad et al., 2017). رابطه‌های (۷) تا (۱۰) به مراحل روش BWM اشاره دارد.

ابتدا باید رابطه بهترین معیار نسبت به سایر معیارها مشخص شود. بردار به صورت زیر بیان می‌شود که در آن  $\alpha B1$  ترجیح بهترین معیار، یعنی B را بر معیار j نشان می‌دهد (طبق رابطه ۷). علاوه بر این،  $\alpha BB = 1$ .

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad \text{رابطه ۷}$$

در ادامه، تعیین اهمیت بدترین معیار نسبت به سایر معیارها باید در نظر گرفته شود.

آخرین مرحله در این روش تعیین وزن بهینه معیارها و محاسبه نرخ سازگاری است. وزن معیارها با استفاده از معادلات خطی زیر محاسبه می‌شود. طبق روابط (۸) و (۹):

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \varepsilon \quad w_j \geq 0, \text{ for } \rightarrow \text{all } j \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \varepsilon \quad w_j \geq 0, \text{ for } \rightarrow \text{all } j, \quad \sum_j w_j = 1 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\text{نرخ سازگاری} = \frac{\varepsilon}{\text{شاخص سازگاری}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

نرخ سازگاری در بازه  $[0, 1]$  قرار می‌گیرد و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر این است که مقایسات از سازگاری و ثبات بیشتری برخوردارند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد مقایسات از سازگاری کمتری برخوردارند. در روش BWM نیز عمق آب زیرزمینی به عنوان بهترین معیار و هدایت هیدرولیکی بدترین معیار شناخته شد. وزن‌ها به کمک نرم افزار Lingo به دست آمدند که براساس نتایج حاصل شده عمق بیش‌ترین وزن و شیب کم‌ترین وزن را به خود اختصاص دادند. با استفاده از وزن‌های اصلاح شده، نقشه میزان آسیب‌پذیری در پنج کلاس بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد از  $2/7$  تا  $7/4$  طبقه‌بندی شد (شکل d-۵).

Table 7. Modified weights of DRASTIC parameters based on BWM method

Parameters	Value	Weights - Lingo	DRASTIC Index	Modified weights	Modified weights
Depth of water	W1	0.35	D	5	0.45
Net recharge	W2	0.21	R	4	0.21
Impact of vadose media	W3	0.14	I	5	0.18
Soil media	W4	0.10	S	2	0.05
Topography	W5	0.08	T	1	0.02
Aquifer media	W6	0.07	A	3	0.05
Hydraulic conductivity	W7	0.04	C	5	0.03
	Z	0.066			

### نقشه FR-Entropy

FR-Entropy روش ترکیبی مورد استفاده مبتنی بر روش رتبه‌بندی FR و وزن‌های حاصل از روش آنتروپی است. در لایه وادوز به دلیل یکنواختی آبخوان یاسوج، مقدار یک را به دست آورده است. بنابراین، فاکتور «I» با نرخ سنتی DRASTIC بدون تغییر وارد محاسبه شاخص آسیب‌پذیری شد. با توجه به جدول (۸) که آنتروپی‌های جدید مرتبط با پارامترهای DRASTIC را نشان می‌دهد، تأثیر محیط وادوز بالاترین آنتروپی (مقدار یک) را به دست آورد که نامشخص‌ترین پارامتر

در منطقه مورد مطالعه است. به دلیل بیشترین عدم قطعیت، این پارامتر به ارزیابی آسیب پذیری کمی نکرد. مقدار آسیب پذیری از ۴/۷۰ تا ۷/۷۶ متغیر بود که در پنج کلاس طبقه بندی شد.

**Table 8.** Modified weights of DRASTIC parameters based on FR-Entropy method

Parameters	Entropy	Entropy weight	Modified weight
Depth of water	0.9976	0.173	0.271
Net recharge	0.9972	0.206	0.259
Aquifer media	0.9979	0.155	0.146
Soil media	0.9981	0.142	0.089
Topography	0.9985	0.113	0.035
Impact of vadose media	1	0	0
Hydraulic conductivity	0.9971	0.211	0.199

### نقشه FR\_SPSA

در روش FR-SPSA، اصلاح نرخهای DRASTIC با چارچوب نسبت فرکانس به کمک SPSA انجام شد. شاخص آسیب پذیری با ضرب نرخهای اصلاح شده از FR و وزنهای مشتق شده از SPSA ایجاد شد. آسیب پذیری منطقه مورد مطالعه از شاخص FR-SPSA در پنج کلاس نشان داده شد و مقدار آسیب پذیری از ۱۳۲/۵۷ تا ۱۸۶/۸۹ متغیر است.

**Table 9.** Statistics of single-parameter sensitivity analysis (FR-SPSA)

Parameters	Theoretical weight %	DRASTIC weight	Modified weights	Min %	Max %	Mean %
Depth of water	21.74	5	4.20	11.83	24.67	18.26
Net recharge	17.39	4	2.87	8.72	16.57	12.47
Aquifer media	13.04	3	3.01	9.95	17.97	13.10
Soil media	8.70	2	2.50	7.60	15.03	10.86
Topography	4.35	1	1.16	3.56	7.20	5.04
Impact of vadose media	21.74	5	5	21.98	31.69	25.43
Hydraulic conductivity	13.04	3	3.41	10.97	19.58	14.84

### نقشه FR\_SWARA

اهمیت هر پارامتر براساس رتبه بندی جدید کارشناسان به دست آمده و در جدول (۱۰) وارد شده است. نتیجه ضرب وزنهای شاخص آسیب پذیری و  $W_j$ ، وزنهای اصلاح شده است. نقشه آسیب پذیری در پنج کلاس از ۷/۷۴-۵/۴۲ طبقه بندی شد (شکل ۵-e).

**Table 10.** Modified weights of DRASTIC parameters based on FR-SWARA method

Parameters	Sj	Kj	Qj	Wj	Modified weights	FR-SWARA
Depth of water	0	1	1	0.18	5	0.27
Net recharge	0.09	1.09	0.92	0.17	4	0.19
Impact of vadose media	0.01	1.01	0.91	0.17	5	0.24
Soil media	0.1	1.1	0.83	0.15	2	0.09
Topography	0.1	1.1	0.75	0.14	1	0.04
Hydraulic conductivity	0.39	1.39	0.54	0.10	3	0.09
Aquifer media	0.01	1.01	0.53	0.10	3	0.09

### نقشه FR\_BWM

براساس نظر متخصصان، بهترین معیار عمق آب زیرزمینی و بدترین معیار محیط آبخوان به مدل معرفی شد. پس از پیاده سازی مدل و اعمال وزنهای اصلی شاخص درستی، عمق آب زیرزمینی با وزن ۰/۴۵ بیشترین و شیب با وزن ۰/۰۲ کمترین وزن را به عنوان وزنهای اصلاح شده روش FR-BWM به خود اختصاص دادند. در نهایت نقشه آسیب پذیری آبخوان در پنج طبقه از بسیار کم تا بسیار زیاد طبقه بندی شد (شکل ۵-f).

Table 11. Modified weights of DRASTIC parameters based on FR-BWM method

Parameters	Value	Weights - Lingo	DRASTIC Index	Modified weights	Modified weights
Depth of water	W1	0.35	D	5	0.45
Net recharge	W2	0.21	R	4	0.21
Impact of vadose media	W3	0.14	I	5	0.18
Soil media	W4	0.10	S	2	0.05
Topography	W5	0.08	T	1	0.02
Hydraulic conductivity	W6	0.07	C	3	0.05
Aquifer media	W7	0.04	A	3	0.03
	Z	0.057			

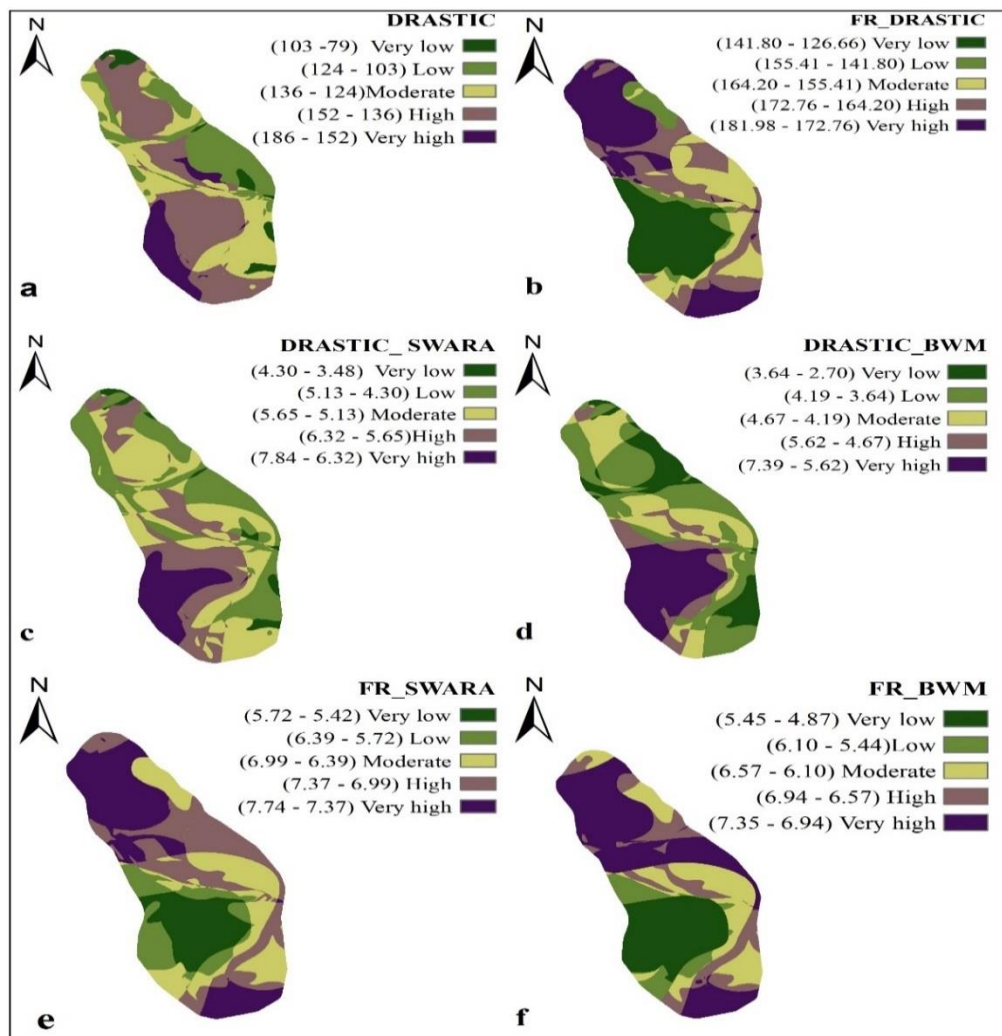


Figure 5. Groundwater vulnerability maps of Yasuj aquifer

### اعتبارسنجی

شاخص‌های آسیب‌پذیری (FR-DRASTIC، FR-BWM، FR-SWARA، DRASTIC-BWM، DRASTIC-SWARA) در برابر مقادیر نیترات منطقه مورد مطالعه (FR-SPSA و FR-Entropy، DRASTIC-SPSA، DRASTIC-Entropy) روش ROC برای اعتبارسنجی همبستگی بین چارچوب‌های آسیب‌پذیری پیشنهادی و غلظت نیترات آزمایشی به‌عنوان شاخص کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. اعتبارسنجی برای ارزیابی دقت و ارزش روش‌ها

موردنیاز است (Obuchowski and Bullen, 2018). نمودار ROC دو محور دارد؛ محور X نرخ مثبت کاذب و Y نرخ مثبت واقعی را نشان می‌دهد. مقدار ناحیه زیر منحنی (AUC) هر چه بالاتر باشد، دقت پیش‌بینی بیشتر است (Bradley, 1997; Pouyan *et al.*, 2021). در مطالعه حاضر منحنی ROC با در نظر گرفتن مقادیر غلظت نیترات‌های زیرزمینی و شاخص‌های آسیب‌پذیری تهیه شد. برای تست مجموعه داده‌ها در این مورد مدل FR-SWARA دارای بالاترین مقدار AUC (۰/۸) داشت و عملکرد بهتری را نسبت به مدل FR-BWM با مقدار AUC (۰/۷۴۴) نشان می‌دهد (جدول ۱۲).

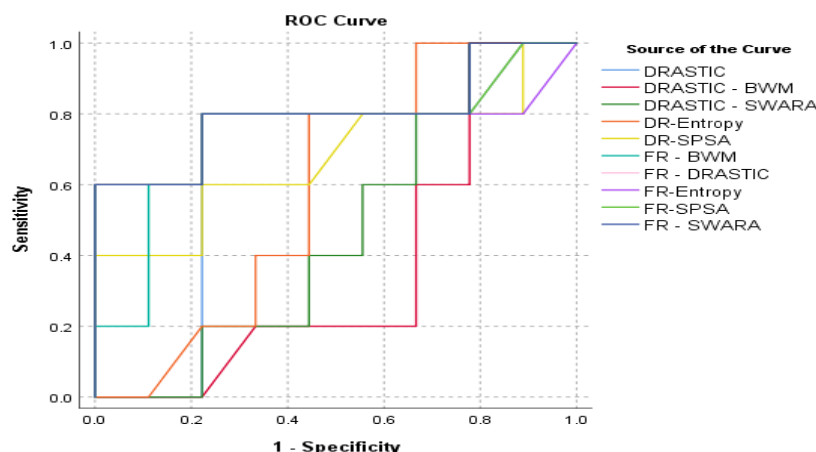


Figure 6. ROC curve plotting between vulnerability indices and nitrate test samples

Table 12. ROC curve between vulnerability indices and nitrate test samples

Area Under the Curve			
DRASTIC	0.67	FR - BWM	0.74
DRASTIC - SWARA	0.47	FR - SWARA	0.80
DRASTIC - BWM	0.37	FR - DRASTIC	0.79
DRASTIC-SPSA	0.68	FR-SPSA	0.79
DRASTIC-Entropy	0.59	FR-Entropy	0.77

#### ۴. نتایج و بحث

ارزیابی آسیب‌پذیری به‌روشنی همپوشانی و شاخص از زمان توسعه آن در اواخر دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان یک ابزار مؤثر ثابت شده است. اگرچه چندین اصلاح و پیشرفت برای روش‌های همپوشانی پیشنهاد شده است، اما هنوز یک روش نمی‌تواند در همه شرایط هیدروژئولوژیکی قابل اجرا باشد (Brindha and Elango, 2015). براساس نتایج حاصل از تمام روش‌های اصلاح اعمال‌شده، نسبت مساحت هر یک از کلاس‌های آسیب‌پذیری متفاوت است و درصد آن در شکل (۷) نشان داده شده است. منطقه شرق منطقه مورد مطالعه برای تمامی روش‌های اصلاح‌شده در منطقه آسیب‌پذیر «کم» و «متوسط» قرار می‌گیرد. شاخص آسیب‌پذیری محاسبه‌شده با روش Entropy-FR، بخش غالب آبخوان (۳۷ درصد) را به‌عنوان یک منطقه آسیب‌پذیر «بالا» در مقایسه با کلاس‌های دیگر تخمین می‌زند. در میان روش‌های ترکیبی متدها با FR، روش FR-Entropy و FR-BWM و به‌ترتیب با ۳۰ و ۳۶ درصد بخش بالایی از آبخوان را در منطقه آسیب‌پذیری «بسیار بالا» پیش‌بینی کرده‌اند. هم‌چنین، سه مدل FR-Entropy، FR-SPSA و FR-SWARA نشان می‌دهند که تنها ۸ درصد از کل منطقه به‌عنوان منطقه آسیب‌پذیر «کم» طبقه‌بندی می‌شود. رویکرد FR-SWARA شمال غرب و جنوب آبخوان را پتانسیل «بسیار بالا» برای آلودگی نترات معرفی کرد. کلاس آسیب‌پذیری «بسیار کم» در منطقه غرب و مرکزی

محدوده مورد مطالعه در برابر آلودگی برای هر چهار روش اعمال شده توسط چارچوب FR که مشابه نقشه نیترا براساس چاه‌های مشاهده است نشان‌دهنده اثربخشی اصلاح نرخ‌ها نسبت به چارچوب عمومی DRASTIC است.

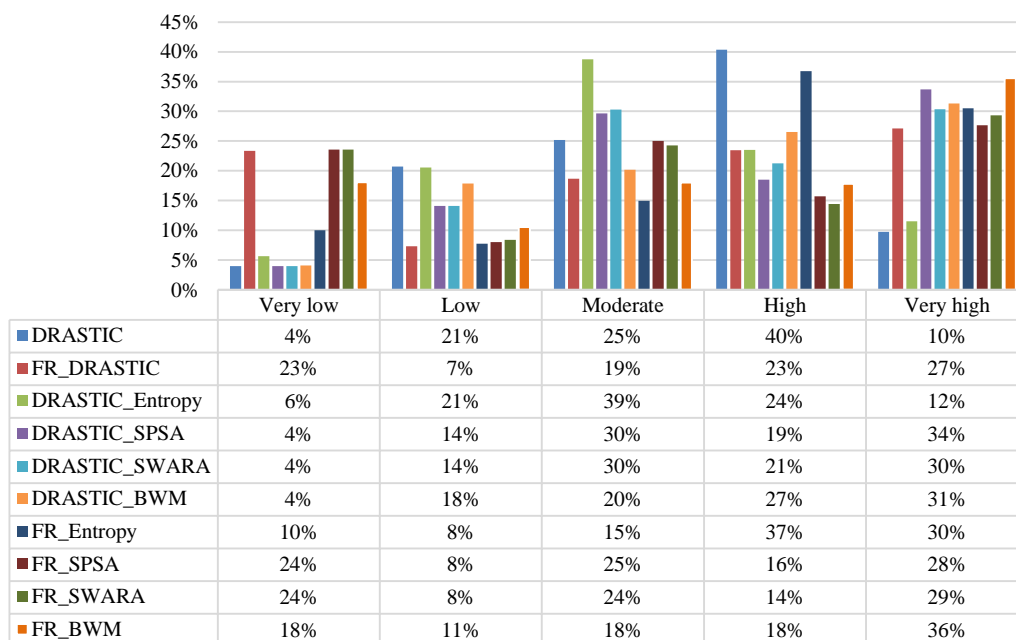


Figure 7. Comparison of the percentage of vulnerability classes based on combined methods

علاوه بر این، نتایج در جدول (۱۲) نشان می‌دهد عملکرد چارچوب DRASTIC می‌تواند با اصلاح نرخ‌ها براساس ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، بیش‌تر بهبود یابد. از آنجایی که محدوده مورد مطالعه در یک منطقه کشاورزی واقع شده است، غلظت نیترا ممکن است در طول زمان تغییر کند. مطالعات بیش‌تر می‌تواند بر جمع‌آوری نمونه‌های بیش‌تر برای ارزیابی آلودگی نیترا بارگذاری شده در سطح دشت یاسوج متمرکز شود. ارزیابی احتمال آلودگی‌های زیرزمینی به‌دلیل کنترل و حفاظت از منابع آب زیرزمینی ضروری است. Chukwuma *et al.* (2023) نشان دادند مدل اصلاح‌شده DEMATEL-ANP بر مبنای مدل DRASTIC، در مقایسه با مدل سنتی درستیک عملکرد بهتری دارد. Liu *et al.* (2022) نیز به اصلاح مدل درستیک سنتی و درستیک با دو عامل کاربری زمین و درجه استخراج‌های زیرزمینی پرداختند (AHP-DRASTIC، WOE-DRASTIC، AHP-DRASTIC و WOE-DRASTIC) و نشان دادند، مدل‌های اصلاح‌شده می‌توانند میزان آسیب‌پذیری‌های زیرزمینی را با دقت بیش‌تری انتقال دهند. در مطالعه حاضر، FR-BWM را به‌عنوان یک روش ترکیبی جدید در پایش آلودگی‌های زیرزمینی پیشنهاد می‌کنیم که می‌تواند یک چارچوب کارآمد باشد. روش مورد استفاده در پژوهش فعلی، روشی سریع و کم‌هزینه برای ارزیابی پتانسیل‌های زیرزمینی است. نتایج پژوهش همبستگی بالایی با پژوهش‌های انجام‌شده در منطقه مورد مطالعه دارد (Torkashvand *et al.*, 2023). نویسندگان معتقدند که روش‌های ترکیبی جدید می‌تواند به‌عنوان چارچوبی برای پژوهش‌های آتی در زمینه‌های مختلف و در مناطق دیگر نیز مفید واقع شود. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود دیگر آلاینده‌ها در منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گیرند. در ضمن اضافه کردن فاکتورهای جدید به مدل سنتی درستیک نیز می‌تواند نقش به‌سزایی در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر داشته باشد.

تصمیم‌گیرندگان، مدیران محیط زیست و برنامه‌ریزان رسمی می‌توانند از این رویکردهای فضایی به‌عنوان مبنایی برای تولید سیاست‌های توسعه پایدار در مورد آلودگی احتمالی آب‌های زیرزمینی استفاده کنند. به‌منظور دستیابی به شرایط قابل اطمینان‌تر منطقه مورد مطالعه برای مقابله با آلودگی خاص، روش انعطاف‌پذیرتری برای تعیین میزان پارامتر و وزن نسبت به DRASTIC مورد نیاز بود. پنج شاخص آسیب‌پذیری اصلاح‌شده شامل FR-DRASTIC، DRASTIC-SPSA، DRASTIC-Entropy، FR-Entropy و FR-SPSA با یکدیگر و همچنین با شاخص DRASTIC مقایسه شدند. در ادامه چهار روش ترکیبی DRASTIC\_SWARA، DRASTIC\_BWM، FR\_BWM و FR\_SWARA نیز مورد آزمایش قرار گرفتند. اعتبارسنجی مدل‌ها نشان‌دهنده بهبود نتایج مبتنی بر روش‌های ترکیبی است. ارزیابی شاخص DRASTIC اصلاح‌شده براساس مقادیر بالاتر سطح زیر منحنی ROC رویکردهای FR-SWARA، FR-SPSA و FR-DRASTIC نشان دادند که شمال‌غرب، شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه به‌طور خاص نیاز به آگاهی بیش‌تر از تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان محیطی برای کاهش فعالیت‌های انسانی دارند.

## ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Groundwater Vulnerability Assessment
2. Single Parameter Sensitivity Analysis
3. Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis
4. Best Worst Method
5. Receiver Operating Characteristic

## ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷. منابع

- Ahmad, W. N. K. W., Rezaei, J., Sadaghiani, S., & Tavasszy, L. A. (2017). Evaluation of the external forces affecting the sustainability of oil and gas supply chain using Best Worst Method. *Journal of Cleaner Production*, 153, 242-252.
- Ahmed, A. A. (2009). Using generic and pesticide DRASTIC GIS-based models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer at Sohag, Egypt. *Hydrogeology Journal*, 17(5), 1203-1217.
- Aller, L., Lehr, J., & Petty, R. (1987). DRASTIC: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National water well Association Worthington, Ohio 43085. Truman Bennett. Bennett and Williams. Inc. Columbus, Ohio, 43229.
- Bradley, A. P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern recognition*, 30(7), 1145-1159.
- Brindha, K., & Elango, L. (2015). Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. *Journal of hydrology*, 524, 597-613.
- Bordbar, M., Neshat, A., Javadi, S., & Shahdany, S. M. H. (2021). A hybrid approach based on statistical method and meta-heuristic optimization algorithm for coastal aquifer vulnerability assessment. *Environmental Modeling & Assessment*, 26, 325-338.
- Busico, G., Kazakis, N., Cuoco, E., Colombani, N., Tedesco, D., Voudouris, K., & Mastrocicco, M. (2020). A novel hybrid method of specific vulnerability to anthropogenic pollution using multivariate statistical and regression analyses. *Water Research*, 171, 115386.
- Chen, W., Pourghasemi, H. R., Kornejady, A., & Zhang, N. (2017). Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques. *Geoderma*, 305, 314-327.



- Chukwuma, E. C., Okonkwo, C. C., Afolabi, O. O. D., Pham, Q. B., Anizoba, D. C., & Okpala, C. D. (2023). Groundwater vulnerability to pollution assessment: an application of geospatial techniques and integrated IRN-DEMATEL-ANP decision model. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 49856-49874.
- Expósito, J. L., Esteller, M. V., Paredes, J., Rico, C., & Franco, R. (2010). Groundwater protection using vulnerability maps and wellhead protection area (WHPA): a case study in Mexico. *Water resources management*, 24, 4219-4236.
- Gorelick, S. M., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, 51(5), 3031-3051.
- Hao, J., Zhang, Y., Jia, Y., Wang, H., Niu, C., Gan, Y., & Gong, Y. (2017). Assessing groundwater vulnerability and its inconsistency with groundwater quality, based on a modified DRASTIC model: a case study in Chaoyang District of Beijing City. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-16.
- Hashemkhani Zolfani, S., Yazdani, M., & Zavadskas, E. K. (2018). An extended stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) method for improving criteria prioritization process. *Soft Computing*, 22, 7399-7405.
- Iqbal, J., Gorai, A., Katpatal, Y., & Pathak, G. (2015). Development of GIS-based fuzzy pattern recognition model (modified DRASTIC model) for groundwater vulnerability to pollution assessment. *International journal of environmental science and technology*, 12, 3161-3174.
- Islam, A. R. M. T., Talukdar, S., Mahato, S., Kundu, S., Eibek, K. U., Pham, Q. B., ..., Linh, N. T. T. (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101075.
- Jenks, G. F. (1977). Optimal data classification for choropleth maps. *Department of Geography, University of Kansas Occasional Paper*.
- Jhariya, D. (2019). Assessment of groundwater pollution vulnerability using GIS-based DRASTIC model and its validation using nitrate concentration in Tandula Watershed, Chhattisgarh. *Journal of the Geological Society of India*, 93, 567-573.
- Kumar, P., Bansod, B. K., Debnath, S. K., Thakur, P. K., & Ghanshyam, C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: a critical evaluation. *Environmental Impact Assessment Review*, 51, 38-49.
- Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T., & Srinivasamoorthy, K. (2021). Sources and consequences of groundwater contamination. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 80, 1-10.
- Liu, M., Xiao, C., & Liang, X. (2022). Assessment of groundwater vulnerability based on the modified DRASTIC model: a case study in Baicheng City, China. *Environmental earth sciences*, 81(8), 230.
- Manap, M. A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W. N. A., & Ramli, M. F. (2014). Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 711-724.
- Neshat, A., & Pradhan, B. (2015). An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater vulnerability assessment. *Natural Hazards*, 76, 543-563.
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., & Shafri, H. Z. M. (2014). Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental earth sciences*, 71, 3119-3131.
- Neshat, A., Pradhan, B., & Dadras, M. (2014). Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 74-86.
- Obuchowski, N. A., & Bullen, J. A. (2018). Receiver operating characteristic (ROC) curves: review of methods with applications in diagnostic medicine. *Physics in Medicine & Biology*, 63(7), 07TR01.
- Paryani, S., Neshat, A., & Pradhan, B. (2021). Spatial landslide susceptibility mapping using integrating an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with two multi-criteria decision-making approaches. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1), 489-509.
- Paryani, S., Neshat, A., Pourghasemi, H. R., Ntona, M. M., & Kazakis, N. (2022). A novel hybrid of support vector regression and metaheuristic algorithms for groundwater spring potential mapping. *Science of The Total Environment*, 807, 151055.
- Pouyan, S., Pourghasemi, H. R., Bordbar, M., Rahmanian, S., & Clague, J. J. (2021). A multi-hazard map-based flooding, gully erosion, forest fires, and earthquakes in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 14889.

- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 747-759.
- Rezaei, F., Safavi, H. R., & Ahmadi, A. (2013). Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: a case study in the Zayandehrood aquifers, Iran. *Environmental management*, 51, 267-277.
- Shakeri, R., Alijani, F., & Nassery, H. R. (2023). Comparison of the DRASTIC+ L and modified VABHAT models in vulnerability assessment of Karaj aquifer, central Iran, using MCDM, SWARA, and BWM methods. *Environmental earth sciences*, 82(4), 97.
- Shrestha, A., & Luo, W. (2018). Assessment of groundwater nitrate pollution potential in Central Valley Aquifer using geodetector-based frequency ratio (GFR) and optimized-DRASTIC methods. *ISPRS international journal of geo-information*, 7(6), 211.
- Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., & Yousefi, H. (2021). DRASTIC framework improvement using stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) and combination of genetic algorithm and entropy. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 46704-46724.
- Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., Yousefi, H., & Berndtsson, R. (2023). Groundwater vulnerability to nitrate contamination from fertilizers using modified DRASTIC frameworks. *Water*, 15(17), 3134.
- Yu, C., Zhang, B., Yao, Y., Meng, F., & Zheng, C. (2012). A field demonstration of the entropy-weighted fuzzy DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment. *Hydrological Sciences Journal*, 57(7), 1420-1432.