



Assessing groundwater vulnerability with DRASTIC and Fuzzy-AHP models and validating results based on nitrate concentration: a case study of Fumanat area, Guilan province

Masoumeh Eghbali Mardekheh¹, Saeid Hamzeh², Najmeh Neysani Samani³, Meysam Argany⁴

1. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: masome.eghbali@ut.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: saeid.hamzeh@ut.ac.ir

3. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: nneysani@ut.ac.ir

4. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: Argany@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

3 August 2024

Received in revised form:

17 October 2024

Accepted:

23 November 2024

Available online:

26 December 2024

Keywords:

Vulnerability,
Ground Water,
DRASTIC,
Fuzzy-AHP,
Nitrate.

ABSTRACT

Groundwater is one of the most important sources of water supply in agriculture and drinking water, nowadays. These sources are very vulnerable to surface pollutant sources such as chemical and animal fertilizers, then identifying areas with high vulnerability is one of the great importance. The aim of this research is to find out vulnerable groundwater areas in the Anzali watershed (Fumanet sub-basin) using DRASTIC and Fuzzy-AHP models. The DRASTIC model uses seven data layers or parameters for modeling, including water depth (D), net recharge (R), aquifer saturation environment (A), soil environment (S), topography (T), impact of vadozone (I), and hydraulic conductivity (C), then it uses fixed weights for input parameters and fixed rankings for sub-parameters. The Fuzzy-AHP model was used to improve the weighting in the DRASTIC model. By validating 20 nitrate wells located in the Fomanat region, using multivariate and univariate linear regression, the output of the Fuzzy-AHP model improved the results compared to DRASTIC. In the vulnerability map produced, the DRASTIC method showed that 0.18% of the area had low vulnerability, 11.22% medium, 58.33% high and 30.42% very high vulnerability. Then, in Fuzzy-AHP, 99.6% low vulnerability, 13.11% medium, 56.45% high and 23.43% very high vulnerability were identified. Both models were successful in identifying areas with medium and high vulnerability risk, and the correlation of the Fuzzy-AHP model with the nitrate map of the region was positive.

Cite this article: Eghbali Mardekheh, M., Hamzeh, S., Neysani Samani, N., & Argany, M. (2024). Assessing groundwater vulnerability with DRASTIC and Fuzzy-AHP models and validating results based on nitrate concentration: a case study of Fumanat area, Guilan province. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (4), 21-38.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.365677.1007789>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Waters are divided into two categories, surface and underground. Surface waters are more exposed to pollution, but with a general view, it can be understood that underground waters are exposed to human settlements so the possibility of sewage entering them is higher. Groundwater supplies more than 60% of irrigated agriculture and 85% of drinking water resources. Underground aquifers in areas that are more populated and economically rich are decreasing. Groundwater as the most important source of water supply plays an important role in agricultural, drinking and industrial uses. Water scarcity occurs in all populated continents. The increase in population also causes the demand for more food resources and the use of chemical fertilizers and pesticides. Throughout history, groundwater has been inseparable from human life and sustainable agricultural production, but it is not evenly distributed around the world.

In Iran, the best source of drinking water supply is underground water. One of the main human inputs for the physical and chemical pollution of underground water is urban and industrial wastewater, which is increasing with population growth, urbanization and lifestyle changes. Groundwater pollutants include organic and inorganic pollutants such as arsenic, mercury, aluminum, lead, fluoride, nitrate, iron, pesticides, chlorinated solvents, where nitrate from fertilizers and animal waste is the most common pollutant. Vulnerability assessment is an essential part of land use planning and zoning protection approaches for groundwater protection. Identifying high risk areas of contamination is essential for healthy management of groundwater resources. Generally the environment is a phenomenon that does not exist in all parts of the world in the same way and any model in any area may not have the same output according to the altitude of the area (flat, hilly or mountainous) and the type of aquifer. Of course it is clear that each model has its advantages and disadvantages so the better results of one model compared to another model in the vulnerable area do not mean that model is rejected.

The aim of this research is to find the vulnerable areas of underground water in the Anzali watershed (Fumanat sub-basin) using DRASTIC and Fuzzy-AHP models in the geographic information system. The land area of Fumanat includes rice fields, tea gardens and fish breeding ponds. The DRASTIC model uses seven data layers for modeling, including water depth (D), net recharge (R), aquifer saturation environment (A), soil environment (S), topography (T), unsaturated zone influence (I), conductivity and hydraulic (C). This model has a fixed weight for the input parameters and a fixed ranking for the sub-parameters that are below the criterion of the input parameters.

Methodology

First, we rank and weight the input layers of the model. The data includes the boundary of the study area, pumping test data, the location of nitrate wells and their concentration, piezometric wells and the water depth of the wells, the layers related to the type of underground soil, the amount of rainfall in the area along with the location of the stations. The elevations of the area and the slope were obtained from the ASTER satellite data with an accuracy of 30 meters and the soil layer of the area was also obtained from the Google Earth Engine system.

The map layers of water depth, aquifer feeding, soil environment, aquifer environment, influence of unsaturated zone, hydraulic conductivity and permeability were prepared using IDW and Kriging methods, depending on which interpolation model had the best adaptation to the area.

Results and discussion

Fuzzy-AHP model was used to improve weighting in DRASTIC model. By validating 20 nitrate wells in Fumanat region, using multivariate and univariate linear regression, Fuzzy-AHP model had a better output than DRASTIC.

For the Fuzzy-AHP method, the same layers classified in the DRASTIC method were used as input, but first, the layers were standardized using the Fuzzy membership command, and then they were divided into four regions with the Reclassify command,

and finally, with AHP model and ranking, A vulnerability map was generated.

The results of the DRASTIC method showed that 0.18% of the area had low vulnerability, 11.22% had medium vulnerability, 58.33% had high vulnerability and 30.42% had very high vulnerability, while in the Fuzzy-AHP model, 6.99% was identified as low vulnerability, 13.11% moderate, 56.45% high and 23.43% very high. By improving the weighting and using fuzzy functions to standardize the inputs and eliminate the uncertainty in the collected data, the vulnerability map had a better match with the nitrate map of the area.

Nitrate does not occur naturally in the ground and enters the ground through surface contaminants, so it is used as a reliable indicator of groundwater vulnerability. Nitrate ions are usually found and measured in wells located in high-risk areas for groundwater pollution. The average nitrate measurement (seasonally in Fumanat area) was used. The nitrate concentration map of the region was also prepared by interpolation method from 20 wells in Fumanat, and then the value of those wells was obtained in all three vulnerability maps produced. Finally the relationship between them was discussed with regression model.

Conclusion

The validation and comparison of the two methods were done. The distribution of nitrate concentration is higher in the west and southwest of Fumanat region, and the concentration of nitrate is higher in the higher altitudes. The results showed that both models were successful in identifying medium and high vulnerable areas, but the correlation of the Fuzzy-AHP model with the nitrate map of the area was positive so this model had better output due to reality of vulnerability.

The high vulnerability was due to the shallow depth of the water table, the unsaturated zone and the high amount of net nutrition under the Fumanat basin. Based on the results of the concentration of nitrate wells, the areas with higher altitude had more pollution, which was somewhat consistent with the DRASTIC model and

Fuzzy-AHP. The cause of high pollution in high areas can be high rainfall and low water depth of piezometric wells, which causes a large amount of surface pollution to enter the underground water table.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and worked equally.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

Sincere thanks to the Regional Water Joint Stock Company of Gilan Province and the esteemed personnel of its Groundwater Studies Group, Mr. Esmaeil Fathi and Mr. Fatehi, Ms. Fatemeh Nazari Mehr and Mr. Hedieh Vakili, and the esteemed CEO of the company for their compassionate and kind cooperation in the country's coronavirus situation. Hoping for the ever-increasing progress of the ever-green Gilan, the paradise of Iran

ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با مدل‌های DRASTIC و Fuzzy-AHP و صحت‌سنجی نتایج بر اساس میزان غلظت نیترات، مطالعه موردی: محدوده فومانات استان گیلان

معصومه اقبالی مردخه^۱، سعید حمزه^۲، نجمه نیسانی سامانی^۳، میثم ارگانی^۴

۱- گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: masome.eghbali@ut.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: saeid.hamzeh@ut.ac.ir

۳- گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mneysani@ut.ac.ir

۴- گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: argany@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ چاپ:

۱۴۰۳/۱۰/۰۶

واژگان کلیدی:

آسیب‌پذیری،

آب زیرزمینی،

دراستیک،

فازی-ای اچ بی،

نیترات.

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در کشاورزی و آب شرب آشامیدنی هستند. این منابع نسبت به منابع آلاینده سطحی از قبیل کودهای شیمیایی و حیوانی بسیار آسیب‌پذیر هستند و تشخیص مناطق با آسیب‌پذیری بالا از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف این پژوهش، یافتن ناحیه‌های آسیب‌پذیر آب زیرزمینی در حوضه آبریز انزلی (زیر حوضه فومانات) با استفاده از مدل‌های DRASTIC و Fuzzy-AHP است. مدل DRASTIC از هفت لایه داده برای مدل‌سازی استفاده می‌کند که شامل عمق آب (D)، تغذیه خالص (R)، محیط اشباع آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) می‌باشد و دارای وزن ثابت برای پارامترهای ورودی و رتبه‌بندی ثابت برای پارامترهای فرعی است. مدل Fuzzy-AHP برای بهبود وزن دهی در مدل DRASTIC استفاده شد. با صحت‌سنجی ۲۰ چاه نیترات واقع در منطقه فومانات، به‌وسیله رگرسیون خطی چند متغیره و تک متغیره، خروجی مدل Fuzzy-AHP نسبت به DRASTIC نتایج را بهبود داد. در نقشه آسیب‌پذیری تولیدشده، روش DRASTIC نشان داد که ۰/۱۸ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب‌پذیری کم، ۱۱/۲۲ درصد متوسط، ۵۸/۳۳ درصد زیاد و ۳۰/۴۲ درصد آسیب‌پذیری خیلی زیاد بودند. سپس در Fuzzy-AHP مقدار ۶/۹۹ درصد آسیب‌پذیری کم، ۱۳/۱۱ درصد متوسط، ۵۶/۴۵ درصد زیاد و ۲۳/۴۳ درصد خیلی زیاد شناسایی شد. هر دو مدل در شناسایی ناحیه‌های با خطر آسیب‌پذیری متوسط و زیاد، موفق عمل کردند و همبستگی مدل Fuzzy-AHP با نقشه نیترات منطقه مثبت شد.

استناد: اقبالی مردخه، حمزه، سعید؛ نیسانی سامانی، نجمه و ارگانی، میثم. (۱۴۰۳). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با مدل‌های DRASTIC و Fuzzy-AHP و صحت‌سنجی نتایج بر اساس میزان غلظت نیترات، مطالعه موردی: محدوده فومانات استان گیلان. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶ (۳)، ۲۱-۳۸.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.365677.1007789>

مقدمه

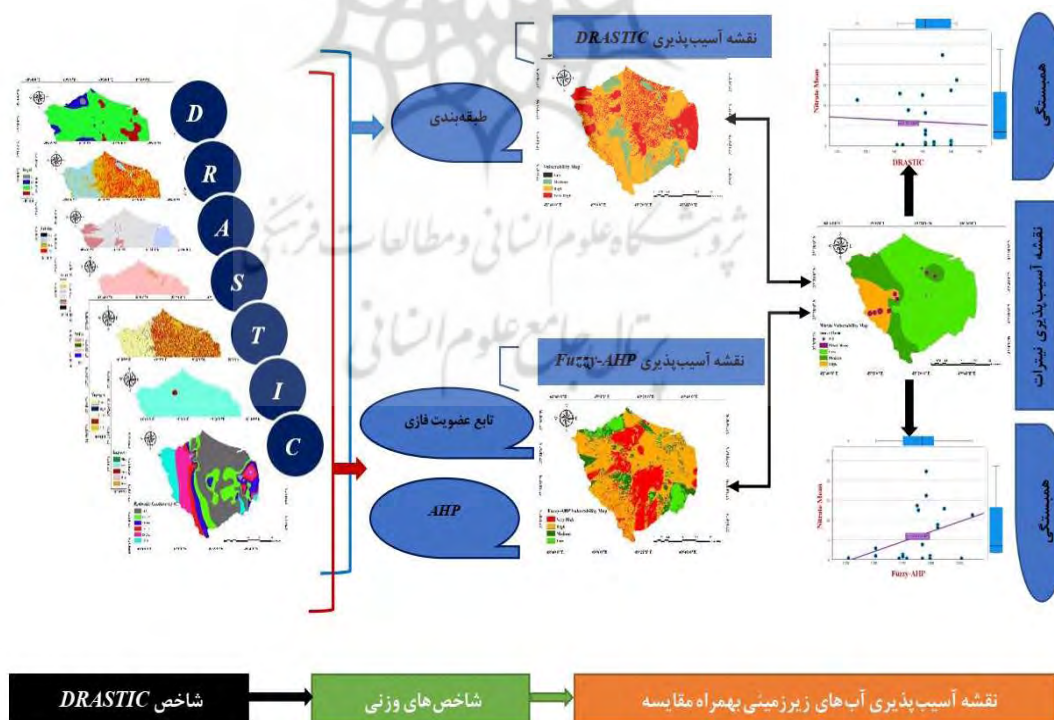
آب‌های زیرزمینی بیش از ۶۰ درصد منابع کشاورزی آبی و ۸۵ درصد آب آشامیدنی را تأمین می‌کنند، اما تنها ۲۲۰۰ کیلومتر مکعب (۲٪) از کل بارندگی سالانه به آن‌ها نفوذ می‌کند. این منابع به‌طور نابرابر توزیع شده‌اند و نقش حیاتی در زندگی انسان و کشاورزی پایدار دارند (Bera et al, 2022). آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان منبع اصلی آب آشامیدنی در کشورهای مانند ایران، در معرض آلودگی ناشی از پساب‌ها و مواد شیمیایی کشاورزی قرار دارند. با افزایش جمعیت و فعالیت‌های کشاورزی، خطر ورود آلاینده‌ها به این منابع حیاتی در حال افزایش است (Markstrom et al, 2008). آلودگی آب‌های زیرزمینی، ناشی از ورود آلاینده‌های آلی و معدنی مانند نیتрат، آرسنیک و فلزات سنگین، به دلیل دشواری تشخیص و کنترل، اثرات بلندمدتی دارد. ارزیابی آسیب‌پذیری و برنامه‌ریزی کاربری اراضی از راهکارهای کلیدی برای حفاظت از این منابع آبی هستند (Bera et al., 2022). مارگات در سال ۱۹۶۸ مفهوم آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را معرفی کرد. روش DRASTIC، که توسط آلر و همکاران در سال ۱۹۸۷ در EPA توسعه یافت، یک سیستم ارزیابی ساختاریافته برای بررسی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی در محیط‌های مختلف ارائه می‌دهد (Bera et al., 2022). مدل‌های عددی مانند MODFLOW، GSFLOW و GW2005 برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی توسعه یافته‌اند، اما به دلیل نیاز به داده‌های ورودی گسترده، زمان محاسباتی بالا و محدودیت در شبیه‌سازی مناطق وسیع، استفاده از آن‌ها برای بسیاری از کاربران دشوار است. در مقابل، مدل DRASTIC به دلیل سادگی و عدم نیاز به داده‌های پیچیده، به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل‌ها هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی دارند (Markstrom et al., 2008; Rahman, 2008). مدل DRASTIC در مطالعات متعددی مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته است (Ganwer et al, 2024; Karimzadeh Motlaghet al, 2023; Ozegin et al, 2024; Smida, Tarki, Gammoudi, & Dassi, 2023; Subbarayan et al, 2024; Umar et al., 2024) و همچنین به ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از این مدل و سایر روش‌های وزن دهی از قبیل AHP پرداخته شده است (Bera et al., 2022; Falowo & Bamoyegun, 2023; Li, 2023; Nguedia et al., 2024; Wang et al., 2023; Karimi, 2018; Kivi, Hamzeh, et al., 2022) در ایران نیز مطالعات متعددی در خصوص این مدل انجام شده است (Moghadam, 2015). نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت فارس-جوققان توسط افروزی و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که شاخص DRASTIC بین ۱۰۰ تا ۱۷۸ متغیر بوده و ۱۰٪، ۲۸٪، ۳۵٪ و ۱۸٪ از سطح منطقه به ترتیب دارای آسیب‌پذیری کم، کم تا متوسط، متوسط تا زیاد و زیاد شناسایی شد (Afrozi & Mohhammadzadeh, 2011; Afrozi & Mohammadzadeh, 2011). بختیاری و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان هشنگرد با استفاده از روش DRASTIC اصلاح‌شده، رگرسیون لجستیک و تحلیل سلسله‌مراتبی پرداختند و نتیجه‌ها نشان داد که تحلیل سلسله‌مراتبی با ضریب همبستگی ۰٫۹۱ بالاترین دقت را در ارزیابی آسیب‌پذیری داشته همچنین کاربری اراضی و اثرات انسانی نیز در محاسبات به‌عنوان پارامتر اضافی در روش DRASTIC اصلاح‌شده لحاظ شدند (Enayat, Ali, & Arash, 2016). بیوکی و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب کوچصفهان با استفاده از شاخص‌های DRASTIC و WRASTIC پرداختند و مشخص شد که پارامترهای بااهمیت بیشتر در ایجاد آلودگی آبخوان با استفاده از شاخص‌های DRASTIC و WRASTIC به ترتیب به عمق آب زیرزمینی و کاربری صنعتی تعلق داشتند. همبستگی نیترات با شاخص DRASTIC و WRASTIC به ترتیب ۰٫۶۱ و ۰٫۵۸ محاسبه شد و بخش غربی آبخوان آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به بخش شرقی داشت (Askarbuyuki et al, 2024). کریم‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی پتانسیل آلودگی آبخوان کهنک با روش DRASTIC پرداختند و پیشنهاد کردند در مناطق با آسیب‌پذیری بالا از ایجاد تأسیسات و استفاده از کودهای شیمیایی

خودداری شود (Karimzadeh et al, 2012). روحی و همکاران (۲۰۱۶) در دشت عجب شیر استان آذربایجان شرقی؛ با مدل های DRASTIC و SI به پهنه بندی آسیب پذیری آب زیرزمینی پرداختند و نتایج نشان داد که بر اساس مدل SI، ۸/۳ درصد منطقه در محدوده آسیب پذیری زیاد قرار گرفته در حالی که بر اساس مدل DRASTIC، این مقدار ۳/۰۸ درصد است. مدل SI با ضریب همبستگی ۰/۷۶ نسبت به مدل DRASTIC دقت بیشتری در نقشه آسیب پذیری منطقه نشان داد (Ruh et al, 2017). مقدم و همکاران (۲۰۰۶) برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت بستان آباد از روش های DRASTIC و SINTACS استفاده کردند. نقشه های آسیب پذیری نشان داد که مناطق مرکزی و شمال غربی دشت آلوده تر هستند (Moghadam et al, 2016).

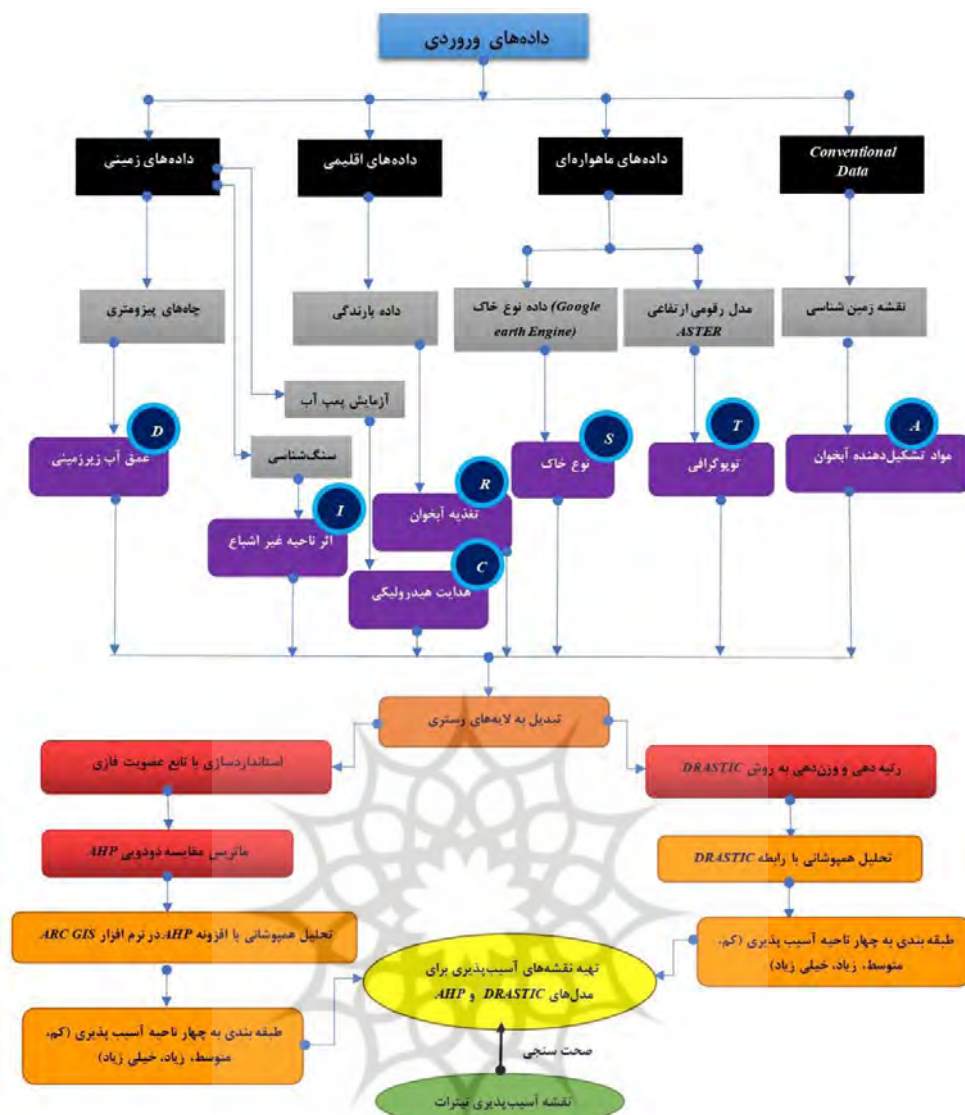
این مطالعه به ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی در منطقه فومنات استان گیلان با استفاده از مدل های DRASTIC و Fuzzy-AHP پرداخته و رابطه بین غلظت نیترات و نقشه های آسیب پذیری را بررسی می کند. این تحقیق نخستین بار در ایران از این دو مدل برای تحلیل آسیب پذیری آب های زیرزمینی در این منطقه استفاده می کند. نتایج این مطالعه می تواند به بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی و کاهش آلودگی نیترات کمک کند.

روش پژوهش

مراحل پژوهش در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شد، که شامل تهیه و وزن دهی لایه های ورودی (مانند مرز منطقه، داده های پمپاژ، چاه های آلوده، پیژومتری، جنس خاک، بارندگی، ارتفاعات و شیب) با استفاده از مدل های DRASTIC و Fuzzy-AHP است. داده ها از شرکت آب منطقه ای گیلان، ماهواره ASTER و گوگل ارث انجین^۱ استخراج شدند و در نهایت، ارزیابی صحت با نقشه نیترات منطقه انجام گرفت.



شکل ۱. فرآیند کلی انجام پژوهش



شکل ۲. فلوچارت انجام پژوهش

پارامترهای مدل DRASTIC در زیر تعریف می‌گردد:

عمق آب زیرزمینی: بیانگر فاصله بین سطح زمین و سطح بالای ناحیه اشباع می‌باشد. همان عمقی که یک آلاینده بایستی طی کند تا به سطح سفره آب زیرزمینی برسد و بالاترین اهمیت را در مدل دارد. بنابراین عمق زیادتر باشد، آلاینده زمان بیشتری را طی می‌کند تا به سفره آب زیرزمینی برسد. به‌طور کلی، با افزایش عمق آب، به‌احتمال زیاد آلودگی از بین می‌رود (Bera et al., 2022).

تغذیه خالص: مقدار آبی است که به آب‌های زیرزمینی می‌رسد و ابزار اصلی برای انتقال آلاینده‌ها است. هرچه حجم تغذیه خالص بیشتر باشد، امکان آلودگی آبخوان نیز بیشتر می‌شود، زیرا آب وسیله‌ای جهت حمل آلاینده‌ها است. این حمل‌ونقل توسط شرایط محیطی و ویژگی‌های زمین‌شناسی کنترل می‌شود. شارژ خالص در واحد میلی‌متر در سال تعریف می‌شود (Saravanan et al., 2023).

محیط آبخوان: شامل فضاهای خالی و شکستگی‌هایی است که آب را نگه‌داشته و عبور می‌دهند. بنابراین مواد تشکیل‌دهنده آبخوان بر جریان درون آن تأثیر می‌گذارند. این مسیر جریان، حرکت آلاینده‌ها را از طریق محیط آبخوان

تعیین می کند (Mahmodzadeh et al., 2013). ماهیت و میزان جریان (رسانایی^۱ هیدرولیکی) یک سفره آب زیرزمینی توسط مواد تشکیل دهنده (رساناها) کنترل می شود (Saravanan et al., 2023).

خاک: لایه رویی پوسته زمین که از فعل و انفعالات پیچیده ای بین ماده اولیه، آب، هوا و موجودات زنده تشکیل شده است (Rahman, 2008). محیط خاک، لایه ای از ناحیه غیراشباع است. ضخامت آن از عمق ۰ الی ۱/۵ متر متغیر بوده و (Bera et al., 2022) تمام فعالیت های گیاهی و زراعی در این محیط انجام می شود که عبور آلودگی به محیط غیراشباع را کنترل می کند (Bera et al., 2022).

توپوگرافی: شیب سطح زمین و تغییرات آن به عنوان توپوگرافی شناخته می شود. در مناطقی که شیب کم است، روان آب برای مدت طولانی تری نگهداری شده و باعث نفوذ بیشتر می شود، بنابراین پتانسیل آلودگی بیشتری دارد (Saravanan et al., 2023).

منطقه غیراشباع: منطقه اشباع نشده بین سطح زمین و سطح آب به عنوان منطقه غیراشباع نامیده می شود. نوع مواد در ناحیه غیراشباع، خصوصیات میرایی آلودگی مانند تخریب بیولوژیکی، فیلتراسیون مکانیکی، جذب، تخریب و پراکندگی را تعیین می کند (Bera et al., 2022).

هدایت هیدرولیکی: آب های زیرزمینی همیشه در حال حرکت هستند و رسانایی هیدرولیکی بیانگر توانایی سفره های زیرزمینی در انتقال آب است (Saravanan et al., 2023). سرعت عبور آلاینده ها از طریق یک سفره آب زیرزمینی با هدایت هیدرولیکی مشخص می شود (Bera et al., 2022).

مدل DRASTIC

این مدل در سال ۱۹۸۷ توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب های زیرزمینی ارائه شد (Bera et al., 2022)، که در آن به هر پارامتر رتبه ای بین ۱ تا ۱۰ و وزنی از ۱ تا ۵ بر اساس اهمیت نسبی در آلودگی اختصاص داده شد (جدول ۱).

جدول ۱. پارامترهای اصلی مدل DRASTIC

وزن ها	توضیحات	پارامتر
۵	عمق، از سطح زمین تا سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته می شود که هرچه قدر بیشتر باشد، احتمال آلودگی کمتر است.	عمق آب زیرزمینی (D)
۴	این پارامتر، مقدار آب در واحد سطح زمین است که به آن نفوذ کرده و به سطح آب زیرزمینی می رسد.	تغذیه آبخوان (R)
۳	میرایی آلودگی آبخوان به مقدار و مرتب سازی دانه های ریز بستگی دارد، اندازه دانه ریزتر باشد ظرفیت ضعیف شدن آبخوان بالاتر است.	مواد تشکیل دهنده آبخوان (A)
۲	محیط خاک بالاترین قسمت زمین است، ویژگی های پوشش خاک بر سطح و حرکت رو به پایین آلاینده ها تأثیر می گذارد.	نوع خاک (S)
۱	مناطق با شیب کم، تمایل به نگهداری آب برای مدت طولانی تر دارند و باعث نفوذ بیشتر آلودگی سطح زمین در آب زیرزمینی می شوند و برعکس	توپوگرافی (T)
۵	این قسمت، زمینی است که بین آبخوان و پوشش خاک وجود دارد که در آن منافذ اشباع نشده است، تأثیر آن بر آلودگی آبخوان مانند پوشش خاک، بسته به نفوذپذیری آن و ویژگی های میرایی محیط است.	اثر ناحیه غیراشباع (I)
۳	یک سفره آب با هدایت بالا در معرض آلودگی قابل توجه است زیرا توده ای از آلودگی می تواند از طریق سفره، سفر هدایت هیدرولیکی آبخوان (C) کند.	هدایت هیدرولیکی آبخوان (C)

۱. رساناها (media): به ترکیب مواد معدنی و آلی که تشکیل دهنده آبخوان هستند اشاره دارد. این مواد می توانند شامل شن، ماسه، خاک رس، سنگ های مختلف و غیره باشند.

لایه‌های عمق آب، تغذیه آبخوان، محیط خاک، محیط آبخوان، تأثیر ناحیه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری با استفاده از روش IDW و Kriging بسته به اینکه کدام مدل درون‌یابی، بهترین انطباق به منطقه را داشتند تهیه شد.

معادله تعیین شاخص DRASTIC (DI) به صورت زیر می‌باشد (Saranya & Saravanan, 2021).

$$\text{Drastic index} = Dr * Dw + Rr * Rw + Ar * Aw + Sr * Sw + Tr * Tw + Ir * Iw + Cr * Cw$$

$$\text{Drastic index} = 5Dr + 4Rr + 3Ar + 2Sr + Tr + 5Ir + 3Cr$$

در این فرمول r ، بیانگر رتبه و w ، بیانگر وزن می‌باشد و پارامترهای آن به صورت زیر است.

D = عمق آب زیرزمینی، R = تغذیه آبخوان، A = محیط آبخوان، S = خاک، T = توپوگرافی، I = اثر ناحیه غیراشباع

C = هدایت هیدرولیکی، r = رتبه، w = وزن

مدل Fuzzy-AHP

از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره روش AHP یا تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد که اولین بار توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰ به وجود آمد (Roqiyeh, Mortezi, & Majid). این روش برای برتری مقایسه‌ای چند شاخص نسبت به یکدیگر، رتبه‌ای می‌دهد که بهترین تصمیم صورت بگیرد. با استفاده از ماتریس مقایسه‌ای دو به دو، همه معیارها با هم مقایسه شده و رتبه دهی و وزن دهی آن‌ها نسبت به مقایسه با معیارهای دیگر صورت می‌گیرد. امتیازدهی معیارها از ۱ (کم‌اهمیت) تا ۹ (بیشترین اهمیت) صورت می‌گیرد. سپس برای اطمینان از درستی ماتریس مقایسه‌ای، نرخ ناسازگاری (IR) با استفاده از بیشترین مقدار بردار ویژه ماتریس مقایسه‌ای (λ_{max}) محاسبه شده و سپس شاخص ناسازگاری ($I.I$) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه n تعداد پارامترهای ماتریس مقایسه‌ای دو به دو است. نتایج نرخ ناسازگاری (CI) از تقسیم شاخص ناسازگاری بر شاخص تصادفی (RI) مطابق جدول ۲ به دست می‌آید. نرخ ناسازگاری کوچک‌تر از ۰/۱ قابل قبول است (Roqiyeh et al., 2017). البته تمامی محاسبات شاخص ناسازگاری با افزونه AHP محاسبه شده و برای استانداردسازی لایه‌های ورودی نیز از تابع‌های Fuzzy membership استفاده شد.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$

جدول ۲. مقادیر شاخص تصادفی DRASTIC

تعداد پارامتر	شاخص تصادفی
۱	۰
۲	۰
۳	۰/۵۸
۴	۰/۹
۵	۱/۱۲
۶	۱/۲۴
۷	۱/۳۲
۸	۱/۴۱
۹	۱/۴۵
۱۰	۱/۴۹

محدوده مورد مطالعه

منطقه فومنات در استان گیلان، واقع در ساحل غربی دریای خزر، با مختصات جغرافیایی ۴۵°۴۸' تا ۴۶°۴۹' شمالی و ۳۷° طول شرقی و ارتفاع ۲۱- تا ۱۰۰ متری از سطح دریا، شامل شالیزارهای برنج، باغ‌های چای و استخرهای پرورش

ماهی است. با توجه به وابستگی این فعالیت ها به منابع آب زیرزمینی، ارزیابی کیفیت آب های زیرزمینی این منطقه از اهمیت حیاتی برخوردار است. فومنتات (شکل ۱)، به دلیل جریان های جوی شمالی-جنوبی و تأثیر رشته کوه البرز، دارای آب و هوای مرطوب و سرسبز با بارندگی سالانه ۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ میلی متر است. بیشترین بارندگی در پاییز و کمترین آن از خرداد تا شهریور رخ می دهد.



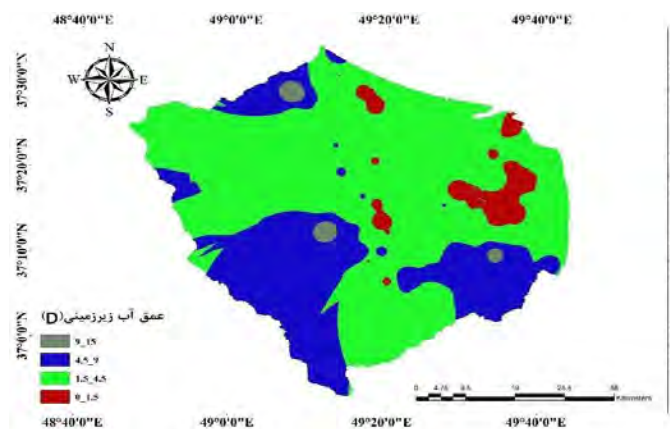
شکل ۳. محدوده مطالعاتی فومنتات در استان گیلان

یافته ها

عمق آب

مطابق شکل های ۱ و ۴، عمق آب دوره ده ساله ۸۷ چاه پیزومتری^۱ منطقه فومنتات با هم جمع شدند و میانگین آن به عنوان پارامتر عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی در نظر گرفته شد شکل ۴ نشان می دهد عمق آب زیرزمینی از ۵/۱ تا ۱۵ متر متغیر است و در رتبه بندی DRASTIC، سطوح عمیق تر آب زیرزمینی آسیب پذیری کمتری دارند و رتبه پایین تری دریافت می کنند. جدول ۳ نیز اهمیت نسبی عمق سطح ایستابی را نمایش می دهد.

¹ Piezometric wells



شکل ۴. عمق سطح ایستابی آب زیرزمینی

جدول ۳. رتبه‌بندی عمق آب زیرزمینی

رتبه‌بندی	عمق آب زیرزمینی (D)
رتبه‌بندی	طبقه‌ها (متر)
۱۰	۰ الی ۱/۵
۹	۱/۵ الی ۴/۵
۷	۴/۵ الی ۹
۵	۹ الی ۱۵
۳	۱۵ الی ۲۳
۲	۲۳ الی ۳۰/۵
۱	>۳۰/۵

تغذیه خالص

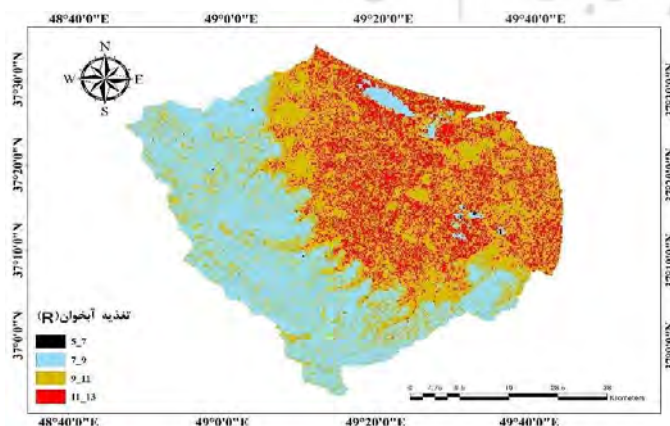
پیسکوپو، ۲۰۰۱ تغذیه خالص را بر اساس رتبه میزان بارندگی، شیب و نفوذپذیری خاک منطقه محاسبه کرد. معادله پیسکوپو به صورت رابطه زیر است (Roqiye et al., 2017):

$$\text{Recharge value} = \text{Slope (\%)} + \text{Rainfall (mm)} + \text{Soil permeability}$$

برای محاسبه تغذیه خالص، از مدل رقومی ارتفاعی نقشه شیب، از داده‌های ایستگاه‌های باران سنجی نقشه بارندگی، و از نقشه خاک‌شناسی لایه نفوذپذیری تهیه شد. این پارامترها مطابق معیارهای جدول ۴ ارزش‌گذاری و سپس همپوشانی شدند تا لایه تغذیه خالص بر اساس جدول ۵ رتبه‌بندی شود (Pacheco et al, 2015). شکل ۵ رتبه‌بندی لایه تغذیه خاص می‌باشد.

جدول ۴. رتبه‌بندی لایه تغذیه خالص

نفوذپذیری خاک	بارندگی (میلی‌متر)	شیب (درصد)	تغذیه خالص
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۵	بالا	۴	>۸۵۰
۴	نسبتاً بالا	۳	۷۰۰ الی ۸۵۰
۳	متوسط	۲	۵۰۰ الی ۷۰۰
۲	کند	۱	>۵۰۰
۱	خیلی کند	-	-



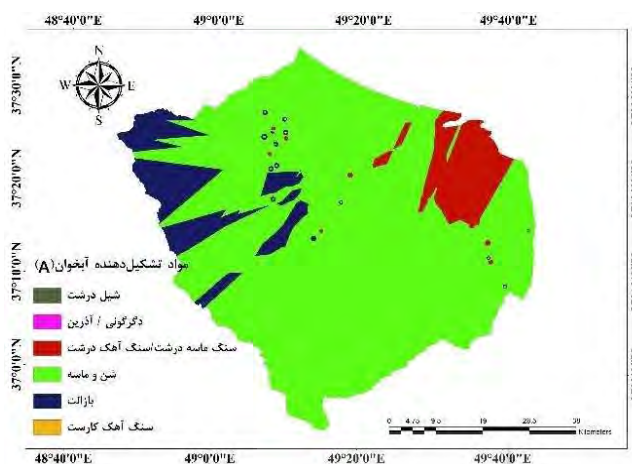
شکل ۵. لایه تغذیه آبخوان

جدول ۵. رتبه‌بندی لایه تغذیه آبخوان

رتبه‌بندی	تغذیه آبخوان (R)
رتبه‌بندی	طبقه‌ها (میلی‌متر)
۱	۰ الی ۵۰
۳	۵۰ الی ۱۰۰
۶	۱۰۰ الی ۱۸۰
۸	۱۸۰ الی ۲۵۰
۹	>۲۵۰

محیط آبخوان

شکل ۶ نشان می‌دهد که نفوذپذیری بالا باعث افزایش ورود آب و آلودگی‌ها به آبخوان می‌شود. محیط آبخوان مسیر و طول حرکت آلاینده‌ها را کنترل می‌کند، که همراه با رسانایی هیدرولیکی و شیب توپوگرافی، بر زمان فرآیندهای میرایی مانند جذب و واکنش‌پذیری تأثیرگذار است (Rahman, 2008). جدول ۶، رتبه‌بندی محیط آبخوان است.



شکل ۶. لایه محیط آبخوان

جدول ۶. رتبه‌بندی لایه محیط

آبخوان (Rahman, 2008)

محیط آبخوان (A)	
رتبه‌بندی	طبقه‌ها
۲	شیل درشت
۳	دگرگونی / آذرین
۶	بستر، سنگ ماسه، سنگ آهک
۶	سنگ ماسه درشت
۶	سنگ آهک درشت
۸	شن و ماسه
۹	بازالت
۱۰	سنگ آهک کارست

لایه خاک

در جدول ۷، رتبه‌بندی لایه خاک و با توجه به آن شکل ۷ به دست آمد.



شکل ۷. لایه خاک

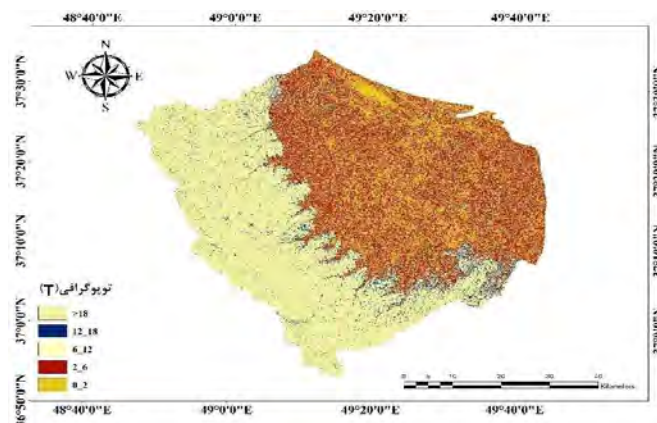
جدول ۷. رتبه‌بندی لایه

خاک (Bera et al., 2022)

نوع خاک (S)	
رتبه‌بندی	طبقه‌ها
۱	خاک رس
۲	خاک رس سیلتی
۴	شنی
۴	خاک رس سیلتی
۴	سیلتی و لوم سیلتی
۵	خاک رس شنی
۵	خاک گلدانی

توپوگرافی

نقشه توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی ماهواره ASTER با دقت ۳۰ متر تهیه شد و منطقه مورد مطالعه بر اساس شیب به پنج کلاس تقسیم گردید: کمتر از ۲٪ (تقریباً مسطح)، ۲-۶٪ (ملایم)، ۶-۱۲٪ (متوسط)، ۱۲-۱۸٪ (تند) و بیش از ۱۸٪ (بسیار تند) (شکل ۸). رتبه‌بندی لایه توپوگرافی مطابق با جدول ۸ انجام می‌شود.



شکل ۸. توپوگرافی منطقه فومنات

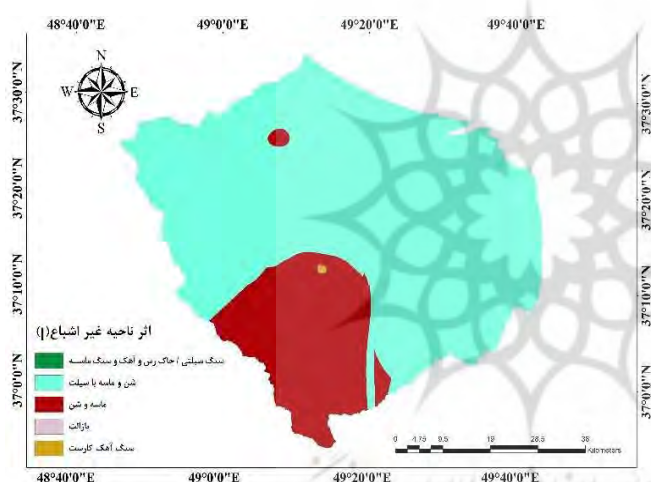
جدول ۸: رتبه‌بندی لایه توپوگرافی

(Bera et al., 2022)

رتبه‌بندی لایه توپوگرافی (T)	
رتبه‌بندی	طبقه‌ها (شیب)
۱۰	۰ الی ۲
۹	۲ الی ۶
۵	۶ الی ۱۲
۳	۱۲ الی ۱۸
۱	>۱۸

لایه محیط غیراشباع

برای تهیه لایه محیط غیراشباع از چاه‌های پیزومتری و اکتشافی استفاده شد (شکل ۹) و مطابق جدول ۹ برای این شاخص نیز رتبه‌بندی انجام شد.



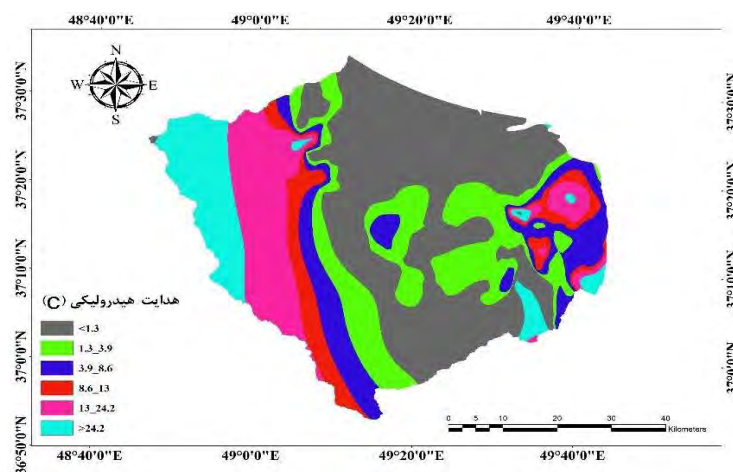
شکل ۹. ناحیه غیراشباع

جدول ۹. رتبه‌بندی لایه محیط غیراشباع (Bera et al., 2022)

رتبه‌بندی لایه محیط غیراشباع (I)	
رتبه‌بندی	طبقه‌ها
۳	سیلتی / سفالی
۳	شیل
۳	سنگ آهک
۶	ماسه سنگ
۶	گچ‌بری، سنگ آهک، سنگ ماسه
۶	شن و ماسه با سیلت
۸	شن و ماسه
۱۰	سنگ آهک کارست

لایه هدایت هیدرولیکی

مقادیر رسانایی هیدرولیکی پس از محاسبه قابلیت انتقال از داده‌های آزمایش پمپاژ، محاسبه شده و همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، تهیه شد. مناطق هدایت هیدرولیکی مختلف با توجه به جدول ۱۰، تعیین و رتبه‌بندی شد. شکل ۱۰ لایه هدایت هیدرولیکی منطقه فومنات می‌باشد.



شکل ۱۰. هدایت هیدرولیکی

جدول ۱۰. رتبه‌بندی لایه هدایت هیدرولیکی (Saravanan et al., 2023)

رتبه‌بندی	طبقه‌ها (M/day)	هدایت هیدرولیکی آبخوان (C)
۱	۰/۰۱ الی ۱/۳	
۲	۱/۳ الی ۳/۹	
۴	۳/۹ الی ۸/۶	
۶	۸/۶ الی ۱۳	
۸	۱۳ الی ۲۴/۲	
۱۰	>۲۴/۲	

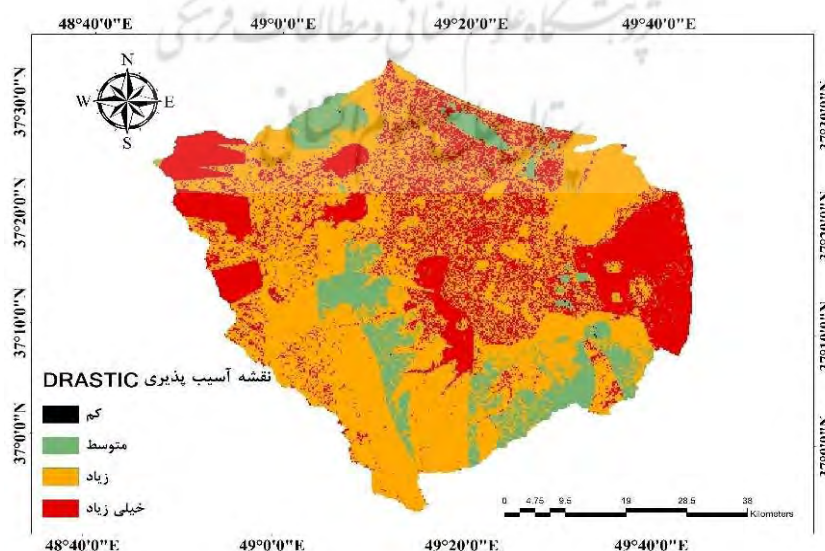
بحث

نقشه آسیب‌پذیری DRASTIC

از هفت پارامتر DRASTIC برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آب‌های زیرزمینی استفاده شد. پس از ضرب هر پارامتر در ضریب وزنی مربوطه، نقشه نهایی آسیب‌پذیری (شکل ۱۱) تهیه و محدوده فومنت در چهار کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد مطابق جدول ۱۱ طبقه‌بندی شد.

جدول ۱۱. نتایج شاخص DRASTIC

کلاس آسیب‌پذیری	محدوده DRASTIC	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
کم	۱۱۱ الی ۱۱۹	۶۹۰۳۵۴/۱۱۵۸۳۹	۰/۰۱۸
متوسط	۱۱۹ الی ۱۳۹	۴۲۷۲۳۰۶۱۹/۰۰۸	۱۱/۲۲
زیاد	۱۳۹ الی ۱۵۹	۲۲۲۱۰۱۷۳۴۸/۸۸	۵۸/۳۳
خیلی زیاد	۱۵۹ الی ۱۹۴	۱۱۵۸۴۶۳۶۳۴/۸۵	۳۰/۴۲
جمع کل		۳۸۰۷۴۰۱۹۵۶/۹۲۳۸۳۹	۱۰۰



شکل ۱۱. نقشه آسیب‌پذیری به روش DRASTIC

نقشه آسیب‌پذیری Fuzzy-AHP

برای تجدیدنظر در وزن پارامترهای مدل DRASTIC، از تحلیل سلسله مراتبی AHP و تابع Fuzzy membership استفاده شد. ضریب اهمیت پارامترها با شاخص ناسازگاری ۰,۰۲۵، محاسبه و وزن‌های اصلاح‌شده هر لایه ورودی تعیین شدند (جدول ۱۳ و شکل ۱۲) (Vasudeo, Landge, & Ghare, 2016). جدول ۱۴ نیز نتیجه طبقه‌بندی منطقه به آسیب‌پذیری از کم تا زیاد می‌باشد.

جدول ۱۲. رتبه‌بندی Fuzzy-AHP (Bera et al., 2022)

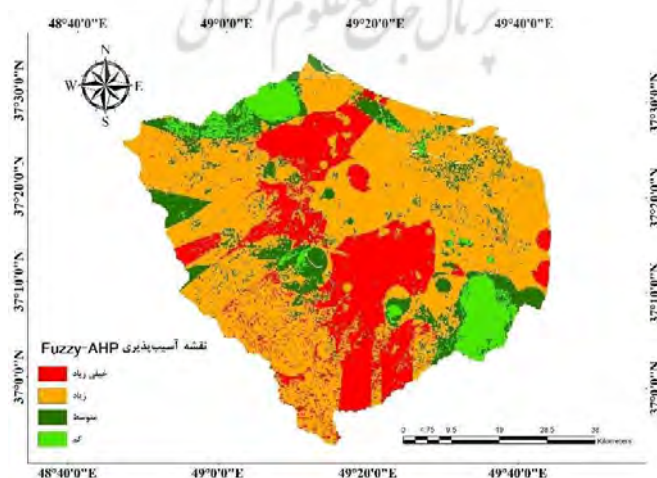
ورودی - Fuzzy AHP	عمق آب (D)	تغذیه آبخوان (R)	مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (A)	خاک (S)	توپوگرافی (T)	اثر ناحیه غیراشباع (I)	هدایت هیدرولیکی (C)
عمق آب (D)	۱	۳	۵	۶	۷	۲	۴
تغذیه آبخوان (R)	۰/۳۳۳	۱	۳	۴	۵	۰/۵	۲
مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (A)	۰/۲	۰/۳۳۳	۱	۲	۳	۰/۲۵	۰/۵
خاک (S)	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۵	۱	۲	۰/۲	۰/۳۳۳
توپوگرافی (T)	۰/۱۴۲	۰/۲	۰/۳۳۳	۰/۵	۱	۰/۱۶۶	۰/۲۵
اثر ناحیه غیراشباع (I)	۰/۵	۲	۴	۵	۶	۱	۳
هدایت هیدرولیکی (C)	۰/۲۵	۰/۵	۲	۳	۴	۰/۳۳۳	۱

جدول ۱۳. وزن نهایی پارامترها در مدل Fuzzy-AHP

ورودی	عمق آب (D)	تغذیه آبخوان (R)	مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (A)	خاک (S)	توپوگرافی (T)	اثر ناحیه غیراشباع (I)	هدایت هیدرولیکی (C)
وزن	۰/۳۵۴۲۵	۰/۱۵۸۶۵	۰/۰۶۷۵۶	۰/۰۴۴۷۷	۰/۰۳۱۱۷	۰/۲۳۹۳۳	۰/۱۰۳۶۲

جدول ۱۴. نتایج شاخص آسیب‌پذیری Fuzzy-AHP

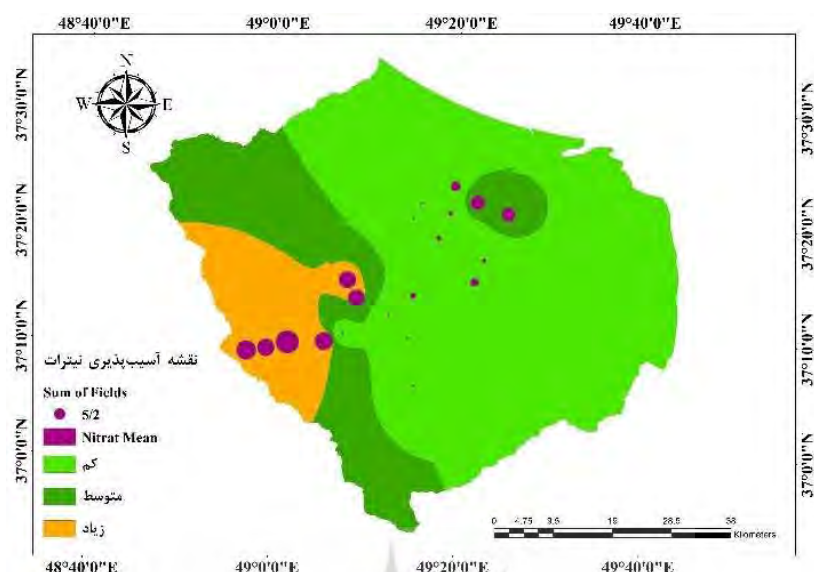
کلاس آسیب‌پذیری	محدوده Fuzzy-AHP	مساحت (مترمربع)	درصد مساحت
کم	۱/۲۰۶۵۹ الی ۱/۸۰۹۰۳	۴۰۶۰۸۳۳/۹۶۳	۶/۹۹
متوسط	۲/۱۶۳۶۲ الی ۱/۸۰۹۰۳	۷۶۱۴۲۶۰/۶۵۵	۱۳/۱۱
زیاد	۲/۵۶۱۲۶ الی ۲/۱۶۳۶۲	۳۲۷۷۴۲۵۵/۰۱	۵۶/۴۵
خیلی زیاد	۳/۴۶۱۷۳ الی ۲/۵۶۱۲۶	۱۳۶۰۳۰۸۴/۶۷	۲۳/۴۳
جمع کل		۵۸۰۵۲۴۳۴/۳	۱۰۰



شکل ۱۲. نقشه آسیب‌پذیری Fuzzy-AHP

نقشه آسیب‌پذیری نیترات

از میانگین اندازه‌گیری چاه‌های آلوده به یون نیترات استفاده شد (شکل ۱۳ موقعیت این چاه‌ها و مقادیر غلظت آن‌ها).



شکل ۱۳. نقشه آسیب‌پذیری منطقه بر اساس غلظت نیترات ۲۰ چاه

روش DRASTIC بیشتر بر بهینه‌سازی، تنظیم و یا اعتبارسنجی با غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی تمرکز دارند و در برخی موارد، پارامترها حذف، جایگزین و یا اضافه می‌شوند (Voutchkova et al., 2021). نیترات به‌طور طبیعی در زیر زمین وجود ندارد و از طریق آلاینده‌های سطحی وارد زمین می‌شود بنابراین به‌عنوان یک شاخص معتبر بر آسیب‌پذیری آب زیرزمینی استفاده می‌شود (Pacheco et al., 2015). در شکل ۱۳، پراکندگی غلظت نیترات در غرب و جنوب غرب منطقه فومنتا بیشتر و غلظت نیترات در ارتفاعات بالاتر است. نیترات از (۰ الی ۲۱ ppm) برای ۲۰ چاه متغیر است که به سه کلاس کم (۰ الی ۵)، متوسط (۵ الی ۱۰) و زیاد (۱۰ الی ۲۰) برای آسیب‌پذیری تقسیم شدند (Bera et al., 2022). در اینجا از روش رگرسیون خطی چند متغیره^۱ (برای پارامترهای DRASTIC) و رگرسیون خطی تک متغیره^۲ (نقشه آسیب‌پذیری DRASTIC و نقشه آسیب‌پذیری Fuzzy-AHP) استفاده شد. در رگرسیون چند متغیره، مقادیر یک متغیر (متغیر وابسته یا y) از روی مقادیر دو یا چند متغیر دیگر (متغیرهای مستقل $x_1, x_2, \dots, x_k$) برآورد می‌شود. در این روش رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل با ضریب عددی و انطباق یک تابع بین آن‌ها بیان می‌شود (Bera et al., 2022; Pacheco et al., 2015). مطابق جدول ۱۵ مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن، در مدل DRASTIC برابر با ۰/۰۶۹۷- و در مدل Fuzzy-AHP برابر با ۰/۰۵۵۹ می‌باشد. بنابراین دقت روش Fuzzy-AHP از روش DRASTIC در این منطقه بیشتر است.

1. Multivariate linear regression

2. Univariate linear regression

جدول ۱۵. ضریب همبستگی اسپیرمن لایه نیترات

با مدل‌های DRASTIC و Fuzzy-AHP

مدل	ضریب اسپیرمن
DRASTIC	-۰/۰۶
Fuzzy-AHP	۰/۰۵

جدول ۱۶. ضریب همبستگی اسپیرمن لایه نیترات با پارامترهای مدل DRASTIC

وزن	همبستگی ضریب اسپیرمن با لایه نیترات	پارامترهای مدل DRASTIC
۵	-۰/۳۷۵	عمق سطح ایستابی (D)
۴	-۰/۴۲۰	تغذیه خالص (R)
۳	۰/۲۰۱	محیط آبخوان (A)
۲	۰	محیط خاک (S)
۱	-۰/۶۳۶	توپوگرافی (T)
۵	-۰/۱۹۴	محیط غیراشباع (I)
۳	۰/۶۵۵	هدایت هیدرولیکی (C)

مدل ساخته شده بر اساس رگرسیون خطی چند متغیره، برای پارامترهای مدل DRASTIC به صورت زیر می باشد:

$$\text{Nitrate Mean} = -0.071D - 0.197R - 0.5A - 0.51T - 0.391I + 0.202C + 11.497$$

در رابطه بالا همبستگی مثبت برای لایه هدایت هیدرولیکی و همبستگی منفی بین پارامترهای مدل DRASTIC و غلظت نیترات در منطقه وجود دارد که این به دلیل مقادیر بالای نیترات در آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز حوضه فومنات در ارتفاعات می باشد درحالی که در مدل DRASTIC، در ارتفاعات پایین تر که آب جمع می شود، احتمال آلودگی را بالاتر می داند. مطابق (شکل ۱۴) مدل ساخته شده بر اساس رگرسیون خطی تک متغیره برای نقشه آسیب پذیری مدل DRASTIC به صورت زیر می باشد:

$$\text{Nitrate Mean} = (-۰/۰۴) \text{DRASTIC} + ۱۱/۳۵$$

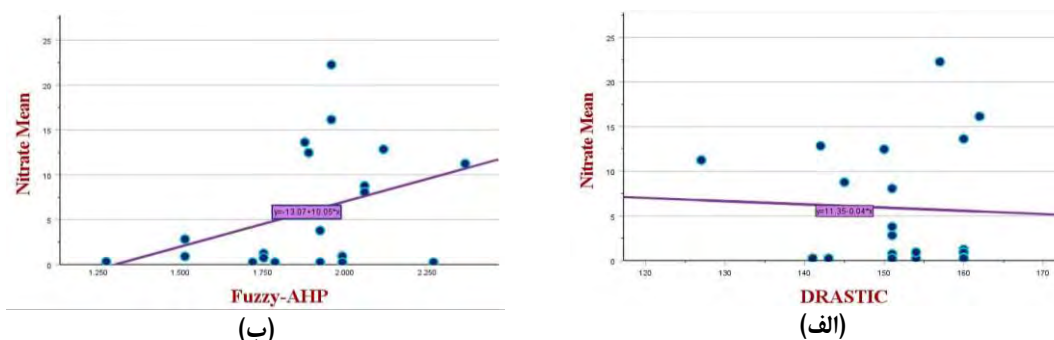
مدل ساخته شده بر اساس رگرسیون خطی تک متغیره و برای نقشه آسیب پذیری مدل Fuzzy-AHP به صورت زیر می باشد:

$$\text{Nitrate Mean} = (۱۰/۰۵) \text{Fuzzy-AHP} + ۱۳/۰۷$$

جدول ۱۷. نتایج مدل‌های مختلف با لایه نیترات در همبستگی اسپیرمن

نام مدل	انحراف معیار	R	R ²
DRASTIC	۶/۹۳	۰/۰۴۶	۰/۰۰۲
Parameters DRASTIC	۱/۰۵۳	۰/۷۶۶	۰/۵۸
Fuzzy-AHP	۶/۴۱	۰/۳۸۲	۰/۱۴۶

در این مطالعه (جدول ۱۷ و شکل ۱۴)، همبستگی بین غلظت نیترات و آسیب پذیری در مدل‌های DRASTIC ($R=۰,۰۴۶$) و Fuzzy-AHP ($R=۰,۳۸۲$) مقایسه شد که نشان دهنده دقت بالاتر Fuzzy-AHP است. همچنین، معادله رگرسیون چندمتغیره بین پارامترهای DRASTIC و غلظت نیترات ($R=۰,۷۶۶$) دقت بهبودیافته‌ای را نسبت به روش DRASTIC معمولی نشان داد. استفاده از توابع فازی در استانداردسازی داده‌ها و بهبود وزن دهی، عدم قطعیت را کاهش داده و تطابق بهتری با نقشه غلظت نیترات در منطقه فومنات ایجاد کرد.



شکل ۱۴. (الف) نمودار رابطه بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و نیترات (ب) رابطه بین نقشه آسیب‌پذیری Fuzzy-AHP و نیترات در سال‌های اخیر، روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (جدول ۱۸)، از نظر دقت مقایسه شده‌اند. روش‌های مبتنی بر فازی و AHP به دلیل بهبود وزن دهی و در نظر گرفتن عدم قطعیت، دقت بالاتری در مناطق با داده‌های پیچیده ارائه می‌دهند. در نتیجه، این روش‌ها برای ارزیابی دقیق‌تر آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در شرایط عدم قطعیت و پیچیدگی داده‌ها مناسب‌تر هستند.

جدول ۱۸. مقایسه پژوهش‌های اخیر ارزیابی آسیب‌پذیری

نتیجه‌گیری	R ²	روش	مقاله
دقت متوسط، مناسب داده‌های ساده	۰٫۷۵	DRASTIC	(Lad et al, 2019)
بهبود دقت با وزن دهی AHP	۰٫۸۲	DRASTIC-AHP	
دقت بالاتر با لحاظ عدم قطعیت	۰٫۸۸	DRASTIC-Fuzzy	
دقت خوب، مناسب مناطق با عدم قطعیت متوسط	۰٫۸۵	Fuzzy DRASTIC	(Saranya & Saravanan, 2021)
دقت بالاتر با افزودن پارامتر کاربری زمین	۰٫۹۰	Fuzzy DRASTIC-L	
دقت متوسط، مناسب داده‌های ساده	۰٫۷۸	DRASTIC	(Saravanan et al., 2023)
بهبود دقت بهبود دقت با وزن دهی AHP	۰٫۸۵	DRASTIC-AHP	
دقت متوسط، مناسب داده‌های ساده	۰٫۷۴	DRASTIC	(Bera et al., 2022)
بهبود دقت با وزن دهی AHP	۰٫۸۸	DRASTIC-AHP	
دقت متوسط، مناسب داده‌های ساده	۰٫۷۶	DRASTIC	(Sresto et al, 2022)
دقت بالاتر با افزودن پارامتر کاربری و روش منطق فازی	۰٫۸۹	Fuzzy DRASTIC-L	

نتیجه‌گیری

محیط‌زیست در تمامی نقاط جهان یکسان نیست بنابراین هر مدلی با توجه به ارتفاعات منطقه (مسطح، تپه‌ای یا کوهستانی) و نوع آبخوان خروجی متفاوتی در ارزیابی آسیب‌پذیری دارد. البته نتایج بهتر یک مدل نسبت به دیگری، به معنای رد شدن آن نمی‌باشد. ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در زیر حوضه فومنات، با مدل‌های DRASTIC و Fuzzy-AHP انجام شد. سپس با مقدار نیترات ۲۰ چاه موجود و رگرسیون خطی، صحت‌سنجی صورت گرفت. با بهبود وزن دهی و استفاده از تابع‌های فازی برای از بین بردن عدم قطعیت موجود در داده‌های جمع‌آوری‌شده، همبستگی نقشه آسیب‌پذیری با نقشه نیترات منطقه بهتر شد. آسیب‌پذیری زیاد به دلیل عمق کم آب، ناحیه غیراشباع و مقدار تغذیه خالص بالا در زیر حوضه فومنات بود. بر اساس غلظت چاه‌های نیترات، در منطقه‌های با ارتفاع بالاتر آلودگی بیشتر بود که این امر با مدل DRASTIC تا حدودی و Fuzzy-AHP کاملاً منطبق بود. علت آلودگی بالا در مناطق مرتفع، بارندگی زیاد و عمق کم آب چاه‌های پی‌زومتری می‌باشد. پیشنهاد می‌شود برای بهبود دقت، کاربری اراضی را به‌عنوان پارامتر اضافی در

نظر گرفت. همچنین ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های وزن دهی مانند ANP DRASTIC، AHP-DEA، Fuzzy-ANP و OWA و رویکردهای مبتنی بر ANN کیفی، نتایج را بهبود می‌بخشند. هر مدل در یک نوع خاصی از شرایط فیزیک زمین و محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با مدل ANP، AHP DRASTIC، نتایج نسبتاً مشابهی دارد ولی ANP زمانی بهتر است که بین معیارها و زیر معیارها روابط متقابلی باشد (Bera et al., 2022).

تأمین مالی

اثر حمایت مالی نداشته است.

مشارکت نویسندگان

خانم معصومه اقبالی: انجام پردازش‌ها و تحلیل‌های مورد نیاز، نوشتن نسخه اولیه مقاله، بازبینی مقاله. سعید حمزه: بیان مسئله، تحلیل نتایج و نوشتن و بازبینی مقاله. نجمه نیسانی سامانی: بازبینی مقاله. میثم ارگانی: بازبینی مقاله.

تضاد منافع

نویسندگان هیچ تضاد منافی را اعلام نکردند.

تقدیر و تشکر

تشکر صمیمانه از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان و گروه مطالعات آب زیرزمینی آن جناب آقایان اسماعیل فتحی و فاتحی، خانم‌ها فاطمه نظری مهر و هدیه وکیلی و مدیرعامل محترم شرکت برای همکاری دلسوزانه و مهربانانه.

منابع

- احمدی فر، رقیه؛ موسوی، سید مرتضی و رحیم زادگان، مجید. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: دشت سراب). *مجله حفاظت از خاک و آب*، ۳۴-۳، ۲۰-۱.
- <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11929.2645>
- اصغری مقدم، اصغر؛ ندیری، عطاالله و پاک‌نیا، وحید. (۱۳۹۴). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بستان‌آباد با استفاده از روش DRASTIC و SINTACS. *هیدروژئومورفولوژی*، ۳(۸)، ۲۱-۵۲. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1395.3.8.2.0>
- افروزی، محسن و محمدزاده، حسین. (۱۳۹۰). ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت فارس - جونقان نسبت به آلودگی با استفاده از شاخص DRASTIC در محیط GIS. *پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*.
- بختیاری، عنایت؛ سلاجقه، علی و ملکیان، آرش. (۱۳۹۵). ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های ترکیبی دراستیک اصلاح‌شده، رگرسیون لجستیک و تحلیل سلسله مراتبی دراستیک (دشت هشتگرد). *تحقیقات خاک و آب ایران*، ۴۷(۲)، ۲۶۹-۲۷۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58333>
- حمزه، سعید، میجانی، نعیم و فیروزجائی کریمی، محمد. (۲۰۱۸). مدل‌سازی ارتباط دمای سطح زمین، شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۰(۱)، ۳۵-۵۵.
- <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.215259.1006930>
- رحیم زاده کیوی، مهسا؛ حمزه، سعید و کاردان مقدم، حمید. (۱۳۹۳). تعیین قابلیت آسیب‌پذیری کیفی آب زیرزمینی دشت بیرجند با استفاده از الگوی دراستیک و واسنجی آن به روش تحلیل سلسله‌مراتبی. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۷(۳)، ۴۸۱-۴۹۸.
- <https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.55343>
- بیوکی شرافتی، عسکر و کاردان مقدم، احمد. (۱۴۰۲). ارزیابی آسیب‌پذیری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با ترکیب دو شاخص DRASTIC و WRASTIC. *تحقیقات خاک و آب ایران*، ۵۴(۱۱)، ۱۷۱۵-۱۷۳۲.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.356270.669463>

نخستین روحی، رضایی مقدم، رحیم‌پور توحید. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل DRASTIC و SI در محیط GIS (مطالعه موردی: دشت عجب‌شیر). *مجله اکوهیدرولوژی*، ۴(۲)، ۵۸۷-۵۹۹.

<https://doi.org/10.22059/ije.2017.61496>

References

- Afrozi, M., & Mohammadzadeh, H. (2011). Assessment and zoning of the vulnerability of the Farsan-Junghan plain aquifer to pollution using the DRASTIC index in a GIS environment. *Paper presented at the The 15th Conference of the Geological Society of Iran*. [In Persian]
- Askarbuyuki, Ahmad, S., & Moghadam, K. (2024). Integrated vulnerability assessment of surface and groundwater resources by combining two indices: DRASTIC and WRASTIC. *Iranian soil and water research*, 54(11), 1715-1732. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.356270.669463> [In Persian]
- Bera, A., Mukhopadhyay, B., P & Das, S. (2022). Groundwater vulnerability and contamination risk mapping of semi-arid Totko river basin, India using GIS-based DRASTIC model and AHP techniques. *Chemosphere*, 307, 135831. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135831>
- Enayat, B., Ali, S., & Arash, M. (2016). Groundwater vulnerability assessment using modified DRASTIC combined methods. *logistic regression and DRASTIC hierarchical analysis (Hashtgerd Plain. Iranian soil and water research)*, 47(2), 269-279. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58333> [In Persian]
- Falowo, O. O., & Bamoyegun, O. A. (2023). AHP GIS-supported overlay/index models in Okeigbo, southwestern Nigeria, for groundwater susceptibility zonation. *HydroResearch*, 6, 184-202. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.05.003>
- Ganwer, S., Sinha, M. K., Multaniya, A. P., & Ghodichore, N. (2024). Introducing reverse Multi Influencing Factor technique in DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101106. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101106>
- Karimi, H. S. M. N. F. M. (2018). Modeling the relationship between land surface temperature, topographic conditions, and vegetation using Landsat 8 satellite images. *Physical geography research*, 50(1), 35-55. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.215259.1006930> [In Persian].
- Karimzadeh Motlagh, Z., Derakhshani, R., & Sayadi, M. H. (2023). Groundwater vulnerability assessment in central Iran: Integration of GIS-based DRASTIC model and a machine learning approach. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101037>
- Kivi, M. R., Hamzeh, S., & Moghadam, H. K. (2015). Determining the vulnerability of groundwater quality in Birjand Plain using the DRASTIC model and its calibration using the Analytic Hierarchy Process. *Physical geography research*, 47(3), 481-498. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.55343> [In Persian]
- 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. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 543-553. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0545-7>
- Li, M., Gao, Q., & Yu, T. (2023). Using appropriate Kappa statistic in evaluating inter-rater reliability. Short communication on "Groundwater vulnerability and contamination risk mapping of semi-arid Totko river basin, India using GIS-based DRASTIC model and AHP techniques". *Chemosphere*, 328, 138565. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138565>
- Mahmodzadeh, E., Rezaian, S., & Ahmadi, A. (2013). Assessment of aquifer vulnerability by DRASTIC, GODS and AVI comparative methods of the Meymeh plain of Isfahan. *J. Environ. Stud*, 39(2), 45-60. <https://doi.org/10.22059/jes.2013.35413>
- Moghadam, A. A., Nadiri, A., & Paknia, V. (2016). Vulnerability assessment of the Bostan Abad Plain aquifer using the DRASTIC and SINTACS methods. *Hydrogeomorphology*, 3(8), 21-52. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58333> [In Persian]
- Nguedia, K. D., Njila, R. N., Ndongo, B., Dongmo, A. K., Jiague, R. R. C., & Tedontsah, V. P. L. (2024). Vulnerability of ground water to pollution in the highlands by a combined approach

- of AHP method and remote sensing. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101184. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101184>
- Ozegin, K. O., Ilugbo, S. O., & Adebo, B. (2024). Spatial evaluation of groundwater vulnerability using the DRASTIC-L model with the analytic hierarchy process (AHP) and GIS approaches in Edo State, Nigeria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103562. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103562>
- Pacheco, F., Pires, L., Santos, R., & Fernandes, L. S. (2015). Factor weighting in DRASTIC modeling. *Science of the Total Environment*, 505, 474-486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.092>
- Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied geography*, 28(1), 32-53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.008>
- Roqiyeh, A. F., Mortezi, M. S & „Majid, R. (2017). Groundwater Pollution Risk Zoning Using GIS (Case Study: Sarab Plain). *Soil and water conservation research*, 24-3, 1-20. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11929.2645> [In Persian]
- Ruhi, N., Moghadam, R., & Portu-Tohid, R. (2017). Groundwater vulnerability zoning using DRASTIC and SI models in GIS environment (Case study: Ajab Shir Plain). *Ecohydrology*, 4(2), 587-599. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61496> [In Persian]
- Saranya, T., & Saravanan, S. (2021). A comparative analysis on groundwater vulnerability models—fuzzy DRASTIC and fuzzy DRASTIC-L. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16195-1>
- Saravanan, S., Pitchaikani, S., Thambiraja, M., Sathiyamurthi, S., Sivakumar, V., Velusamy, S., & Shanmugamoorthy, M. (2023). Comparative assessment of groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC and DRASTIC-AHP for Thoothukudi District, Tamil Nadu India. *Environmental monitoring and assessment*, 195(1), 57. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10601-y>
- Smida, H., Tarki, M., Gammoudi, N., & Dassi, L. (2023). GIS-based multicriteria and artificial neural network (ANN) investigation for the assessment of groundwater vulnerability and pollution hazard in the Braga shallow aquifer (Central Tunisia): A critical review of generic and modified DRASTIC models. *Journal of Contaminant Hydrology*, 104245. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104245>
- Sresto, M. A., Siddika, S., Haque, M. N., & Saroar, M. (2022). Groundwater vulnerability assessment in Khulna district of Bangladesh by integrating fuzzy algorithm and DRASTIC (DRASTIC-L) model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 3143-3157. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01270-w>
- Subbarayan, S., Thiyagarajan, S „Gangolu, S., Devanantham, A., & Masthan, R. N. (2024). Assessment of groundwater vulnerable zones using conventional and Fuzzy-AHP DRASTIC for Visakhapatnam district, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101054. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101054>
- Umar, H. A., Khanan, M. F. A., Shiru, M. S., Ahmed, M. S., Abdullahi, J., Obute, M. A., & Ahmad, A. (2024). Application of modified drastic model for oil spills pollution affecting water quality system in part of Niger delta region of Nigeria. *Journal of Hydrology*, 131446. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131446>
- Voutchkova, D. D., Schullehner, J., Rasmussen, P., & Hansen, B. (2021). A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). *Journal of Environmental Management*, 277, 111330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111330>
- Wang, W., Mwiathi, N. F., Li, C., Luo, W., Zhang, X., An, Y.,... Gao, X. (2022). Assessment of shallow aquifer vulnerability to fluoride contamination using modified AHP-DRASTICH model as a tool for effective groundwater management, a case study in Yuncheng Basin, China. *Chemosphere*, 286, 131601. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131601>