Original Article

Journal of Aquifer and Qanat

Autumn and Winter 2025, Vol. 6, No. 2, pp 237-256

10.22077/jaaq.2025.10182.1129

Definition of the Concept of Exploitation Risk in Groundwater Resources for Aquifer Vulnerability Calibration

Mohammadreza Farshi Baensaf[1], Maryam Rafati[1✉], Hamid Kardan Moghaddam[3]

1. Department of Environment, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy Water Research Institute, Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: mrafati@iau.ac.ir

Submit Date
03 October 2025

Revise Date
15 October 2025

Accept Date
18 October 2025

Keywords:
Vulnerability,
Exploitation Risk,
Drastıc İndex,
İndex Calibration,
Nitrate Concentration.

Extended abstract

Introduction

Groundwater resource management has faced various environmental challenges over the past two decades. In this context, the use of vulnerability indices to assess the status of groundwater resources against pollution and potential risks has gained significant importance. One of the prominent indices in this regard is the DRASTIC index, designed to assess the vulnerability of groundwater resources to pollution (Aller, 1987). Vulnerability is defined based on the likelihood of pollution in groundwater resources, which can be calibrated using qualitative or quantitative pollution parameters to improve the accuracy of identifying areas suitable for development (Azizi et al., 2020). This study aims to enhance the accuracy of this index by introducing the concept of exploitation risk in groundwater resources as a factor for calibration and increasing the precision of aquifer vulnerability assessments. The concept of exploitation risk is defined based on three parameters: nitrate concentration, land-use changes, and well density for water extraction, and is analyzed using machine learning and fuzzy methods. The primary goal of this research is to use this new concept to improve the accuracy of groundwater vulnerability assessments.

Cite this article: Farshi Baensaf, M.R., Rafati, M., & Kardan Moghaddam, H. (2025). Definition of the concept of exploitation risk in groundwater resources for aquifer vulnerability calibration. *Journal of Aquifer and Qanat*, *6* (2), 237-256. DOI: 10.22077/jaaq.2025.10182.1129.

Materials and Methods

Materials and Methods

The study area for this research is the Lāhijān-Fumanat aquifer, located in the southern part of the Caspian Sea. This region is recognized as one of the main water sources due to its unique climatic and geological features. In this area, groundwater exploitation has increased significantly, making it essential to assess the vulnerability of the aquifer accurately. In this study, the DRASTIC index is used to evaluate the vulnerability of the aquifer, and then, using the concept of exploitation risk, parameters related to land-use changes, nitrate concentration, and water resource density are analyzed fuzzily.

The use of the risk concept in evaluating groundwater resources is important from two perspectives: accurately assessing potential quantitative and qualitative changes, and considering variables and the uncertainty of these variables. Different models are employed to calculate the risk, using two concepts: probability × hazard. This simple and practical formula allows us to evaluate risk based on two key components: the likelihood of an event occurring and the severity or risk of that event.

$$R=P\times H \quad (1)$$

Where R is risk, P is the probability of a specific event occurring, and H is the hazard or severity of the consequences of that event.

In this context, the concept of exploitation risk is based on three factors: nitrate concentration (as a qualitative parameter for the DRASTIC index), land-use changes, and water resource density, analyzed using fuzzy logic. Nitrate is used to represent pollutants created by humans, land-use changes represent alterations in the environment, and water resource density indicates the potential for exploitation.

This study employs a machine learning approach to calibrate the weights and ranks of the DRASTIC vulnerability index. Accordingly, the ANFIS simulation method is integrated with two optimization techniques, Grey Wolf Optimization (GWO) and Emperor Penguin Optimization (EO), for calibration. Based on the initial conditions of the DRASTIC weights and ranks, the correlation between the results of this index and nitrate concentration was calculated. In machine learning models, the qualitative risk classification and qualitative parameters are considered independent variables, while the weights and ranks considered in the optimization model are treated as decision variables, with the vulnerability index as the dependent variable. If the correlation is low, machine learning methods are employed with the objective function to maximize the correlation between the vulnerability index and the nitrate concentration.

Results

The calculated DRASTIC index value indicates the level of aquifer sensitivity to pollution, where larger values signify a greater potential for groundwater contamination. The highest levels of sensitivity and vulnerability were found in the northern and northwestern parts of the aquifer, while the southern and eastern parts showed the lowest levels of vulnerability. The analysis of vulnerability in these areas is consistent with the land use, which is predominantly focused on agricultural activities and urban development.(Akpan et al., 2015; Bordbar et al., 2024; Water | Free Full-Text | Groundwater Vulnerability Assessment to Cemeteries Pollution through GIS-Based DRASTIC Index, n.d.). Additionally, the results showed that 22.6% of the aquifer falls into the high vulnerability class, indicating it is sensitive to development. The DRASTIC vulnerability index results indicated that the northern part of the aquifer is more vulnerable compared to other areas, and this is also reflected in the depth of groundwater and the aquifer's composition from various aspects, such as soil, aquifer environment, and unsaturated zone.(Guo et al., 2023). This region has a higher degree of agricultural development and urbanization, and therefore, the results align well with the actual ground realities.

The defined values for the nitrate membership function were based on the membership function at two values: f1 (Spread) and f2 (Midpoint), as shown in Table 1. A nitrate concentration higher than 10 mg/L starts with a membership of 5%, and up to a concentration of 30 mg/L, it is defined as the final limit with a 100% membership. The land-use changes in the region were defined as follows: a 20% change in the removal of natural land and the addition of agricultural or urban land was considered the midpoint, and after a 40% land-use change, the maximum membership (100%) was calculated. A land-use change of more than 40% was introduced as the maximum risk value. The water resource density in the region, considering the volume of exploitation from both surface and groundwater resources relative to the aquifer area, was calculated dimensionally. An increase in this density indicates an exploitation pressure. The average density was calculated as 25%, and the upper limit of this density was calculated as more than 30%. By integrating these three membership functions spatially, the exploitation risk was calculated.

Table (1) - Membership Function Values for the Three Parameters of Exploitation Risk

Parameters	F1 - Spread	F_2 - Midpoint	F_2- patterns
Nitrate	20	0.35	20 ppm
Land use	40%	27%	20%
Water resource density	0.2	0.6	0.25

The results of this study showed that the use of the concept of exploitation risk, particularly with respect to three parameters—nitrate concentration, land-use changes, and well density—significantly improved the accuracy of the DRASTIC index results. The correlation between the DRASTIC index and exploitation risk increased from 0.35 to 0.75 after calibration. This improvement in the accuracy of the indices indicates that the use of machine learning models, especially the ANFIS-EO model, has provided better results in evaluating the vulnerability of groundwater resources. Furthermore, the results showed that the northern and northwestern parts of the aquifer have higher sensitivity compared to other regions due to increased nitrate concentrations caused by agricultural development and population concentration. Parametric analyses revealed that six out of the seven parameters of the DRASTIC index had increased weight, leading to significant changes in the rankings.

Conclusion

The use of the concept of exploitation risk as an innovative tool for calibrating vulnerability indices can significantly improve the accuracy and efficiency of these indices. In this study, using this concept greatly improved the correlation between the DRASTIC index and the level of exploitation risk, and the results showed better alignment with the actual conditions of vulnerable areas. Additionally, the use of machine learning models, especially ANFIS-EO, provided favorable results in calibrating vulnerability indices and reduced uncertainty in the analyses. Overall, this research emphasizes the necessity of using modern approaches and combining various concepts, such as exploitation risk and vulnerability, in the assessment of groundwater resources. It can serve as a guide for better management decisions in protecting groundwater resources.

مقاله پژوهشی

مجله

آبخوان و قنات

دوره ششم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۲۵۶-۲۳۷

jaaq.2025.10182.1129/10.22077

تعریف مفهوم ریسک بهره‌برداری در منابع آب زیرزمینی به‌منظور واسنجی آسیب‌پذیری آبخوان

محمدرضا فرشی باانصاف[۱]| مریم رفعتی[۱،✉]| حمید کاردان مقدم[۲]

۱. گروه محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. عضوء هیات علمی موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

✉نویسنده مسئول: Mrafati@iau.ac.ir

چکیده

در این مطالعه از مفهوم ریسک در بهره‌برداری برای واسنجی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC با توجه به خصوصیت ذاتی بودن آسیب‌پذیری در آبخوان استفاده شد. مفهوم ریسک براساس سه پارامتر غلظت نیترات، تراکم بهره‌برداری از منابع آب و تغییرات کاربری‌اراضی تعریف شد که این عوامل با استفاده از رویکرد فازی تلفیق و تهیه شد. از مفهوم تعریف‌شده برای واسنجی نتایج شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC با استفاده از ۲ مدل یادگیری ماشین استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از مفهوم ریسک برای واسنجی باتوجه به افزایش میزان همبستگی نسبت به استفاده از غلظت نیترات برتری داشته و از این مفهوم برای واسنجی استفاده شد. میزان همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و ریسک از مقدار ۰/۳۵ قبل از واسنجی به مقدار ۰/۷۵ ارتقا یافت. براساس نتایج به‌دست آمده در مرحله واسنجی، مشخص شد که مدل یادگیری ماشین ANFIS-EO باتوجه به بالاتر بودن میزان همبستگی به‌عنوان مدل منتخب تعیین شد. بررسی پارامتری شاخص آسیب‌پذیری نیز نشان داد که در شاخص DRASTIC، ۶ پارامتر افزایش وزن داشته و به‌تبع آن نیز رتبه‌ها به‌صورت محسوسی افزایش داشته است. نتایج محاسباتی نیز گویای این واقعیت بود که بخش‌های شمال و شمال غربی آبخوان به‌دلیل افزایش غلظت نیترات ناشی از توسعه کشاورزی و تمرکز جمعیت دارای حساسیت بالاتری بوده که این موضوع در شاخص DRASTIC کاملاً مشهود شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

کلیدواژه‌ها:

آسیب‌پذیری،
ریسک بهره‌برداری،
شاخص DRASTIC،
واسنجی شاخص،
غلظت نیترات.

مقدمه

موضوع توسعه در دو دهه اخیر با چالش‌های بخش محیط زیست همراه بوده و بسیاری از چالش‌های امروز در اثر ایجاد یک توسعه بدون برنامه‌ریزی و ارزیابی شده ایجاد شده است (Nejatian et al., 2024). در این راستا برنامه‌های مختلفی در راستای نگرش سیستمی به وضعیت منابع طبیعی تعریف‌شده که توانسته در راستای مدیریت بحران محیط زیست تعریف گردد. یکی از این رویکردها، استفاده از شاخص‌ها جهت ارزیابی و در این مطالعه استفاده از مفهوم آسیب‌پذیری مبتنی بر شاخص است (Podlasek et al., 2025). مفهوم آسیب‌پذیری بیش از ۷۰ سال قبل توسط مارگات در بحث منابع آب تعریف و در کاربردهای مختلف از این مفهوم استفاده و بازتعریف شد. در بحث منابع آب زیرزمینی، مفهوم آسیب‌پذیری به‌معنای احتمال ورود آلاینده‌ها در محیط طبیعی به آبخوان تعریف می‌شود که بر مبنای این تعریف آلر شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC را مبتنی بر ۷ مولفه که به ذات یک آبخوان در مقابل آسیب‌پذیری است تعریف کردند (Aller, 1987). این شاخص در ۴۰ سال گذشته توانسته به‌عنوان یک ابزار مناسب در شناسایی عرصه‌های آسیب‌پذیری مورد استفاده قرار گیرد. در حال حاضر توسعه کشاورزی با سرعت بالا و توسعه‌های صنعتی با سرعت پایین‌تر همراه با مهاجرت در کشور در حال انجام است که این موضوع لزوم پایش و ارزیابی مدیریت کیفی منابع آب را لازم دارد. این شرایط در مناطق شمالی کشور باتوجه به پتانسیل‌های مختلف و دسترسی به‌شدت قوت گرفته است (Taheri et al., 2024). مدیریت کیفی منابع آب با توجه به بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، عمق کم آب زیرزمینی، حجم بالای جریانات برگشتی ناشی از مصارف و وجود دریای خزر به‌عنوان یک منبع آب شور تأثیر زیادی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی و سطحی خواهد داشت (Kardan Moghaddam, 2021). سرعت و میزان خودپالایی بیشتر جریان آب سطحی نسبت به آب زیرزمینی اهمیت توجه به ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی را مشهود ساخته و از طرفی نیز وجود چاه‌های جاذب و انتقال آلاینده‌های صنعتی بحث آلودگی منابع آب زیرزمینی را حائز اهمیت ساخته است. براین اساس تدوین یک مدل و رویکرد برای بررسی شرایط فعلی و ارزیابی شرایط آتی آلاینده‌های کیفی منابع آب زیرزمینی در این نوع مناطق که تحت تاثیر توسعه و رشد هستند، بسیار مهم است. لذا با استفاده از روش‌های نوین هوش‌مصنوعی، یک مدل مفهومی برای شبیه‌سازی وضعیت فعلی و آتی آبخوان‌ها برای تحلیل زمانی و مکانی پارامترهای کیفی و آلودگی آبخوان می‌بایست انجام گیرد که می‌تواند در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان مورد تحقیق موثر واقع شود (Najafzadeh et al., 2022).

آسیب‌پذیری براساس مبنای احتمال آلودگی در منابع آب زیرزمینی تعریف‌شده که با استفاده از پارامترهای کیفی یا آلودگی می‌تواند مورد واسنجی قرار گرفته و میزان افزایش دقت در شناسایی مناطق قابل توسعه را نشان می‌دهد (George et al., 2025). استفاده از روش‌های آسیب‌پذیری و واسنجی شاخص‌های مورد استفاده می‌تواند در افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت نتایج به‌دست آمده بسیار حائز اهمیت و مفید باشد. بررسی توسعه روش‌های واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که رویکردهای آماری و روش‌هایی نظیر تحلیل سلسله‌مراتبی یا شانون آنتروپی در ابتدا و در ادامه روش‌های هوش مصنوعی و مدل‌های هیبریدی توانسته دقت نتایج را افزایش قابل توجهی دهد. رویکرد حداکثرسازی همبستگی بین پارامترهای مؤثر در آلودگی و شاخص‌های آسیب‌پذیری مهم‌ترین هدف در واسنجی آسیب‌پذیری بوده است (Lakshminarayanan et al., 2021). در طرف دیگر موضوع واسنجی، تعریف پارامتر یا پارامترهای مناسب برای تعریف تابع هدف واسنجی است. اگرچه ابزارهای هوش مصنوعی

توانسته قابلیت واسنجی را افزایش دهد اما انتخاب پارامتر که اغلب مطالعات مبتنی بر غلظت نیترات به‌عنوان معرف آلودگی است، بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه مفهوم ریسک بهره‌برداری به‌عنوان یک مولفه برای افزایش کارایی شاخص آسیب‌پذیری آبخوان‌ها مبتنی بر عوامل مؤثر تعریف شده است. هدف اصلی این مطالعه تعریف مفهوم ریسک بهره‌برداری به‌منظور واسنجی و افزایش کارایی شاخص آسیب‌پذیری است. مفهوم ریسک می‌بایست دربرگیرنده ابعاد مختلف شناسایی احتمالات کیفی آبخوان باشد که بتواند دقت شاخص آسیب‌پذیری را پس از واسنجی بهبود بخشد. این نوع نگرش می‌تواند در بهبود شناخت پتانسیل توسعه مبتنی بر آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شود و در طرح‌های آزمایشی مورد استفاده قرار گیرد.

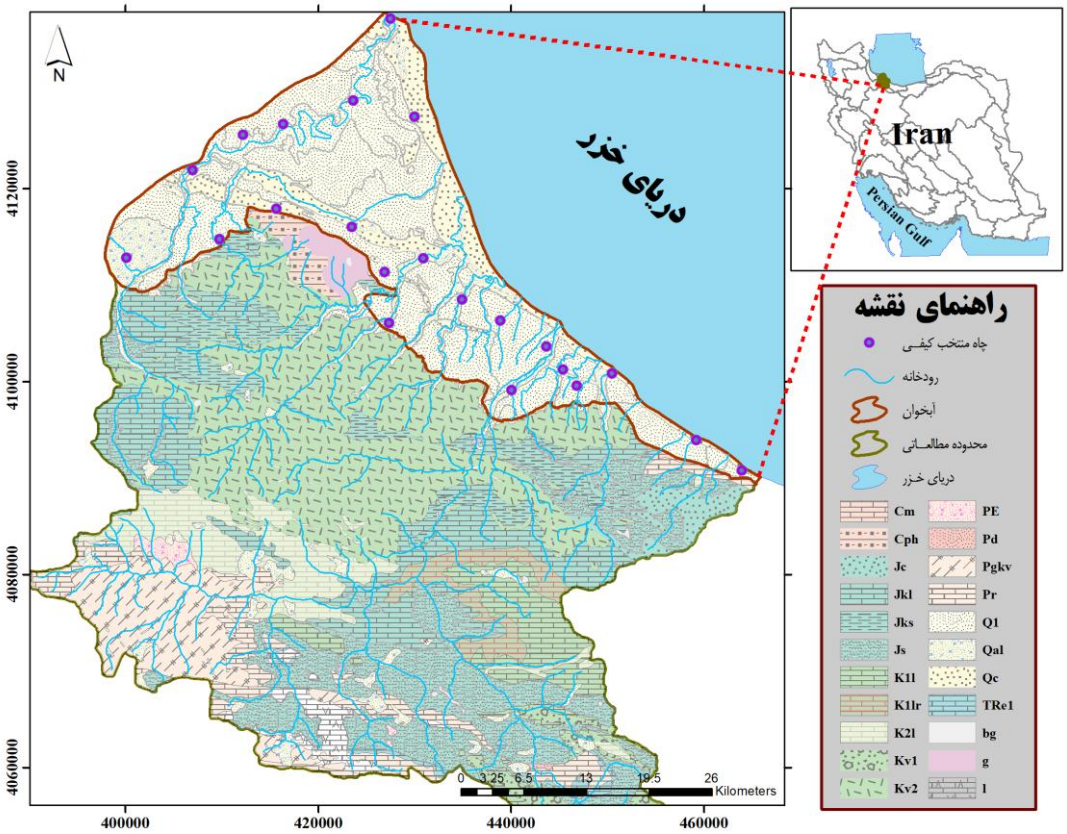
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی لاهیجان-فومنات در بخش جنوبی دریای خزر واقع شده که یکی از منابع تغذیه‌کننده این دریا است. پتانسیل بالای توسعه به‌واسطه جریانات سطحی دائم، اقلیم مناسب، رسوب‌گذاری و پتانسیل بالای خاک و منابع پایدار آب زیرزمینی سبب شده تا کاربری بخش اعظم این منطقه از حالت طبیعی و جنگلی به اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های مسکونی تبدیل شود. رشد توسعه در این منطقه به‌گونه‌ای بوده که هجوم برای کاهش اراضی جنگلی و تبدیل آنها به اراضی کشاورزی و ییلاقی در بخش مرکزی ارتفاعات تمرکز داشته و دشت و ارتفاعات نزدیک به دشت دیگر به‌صورت طبیعی نیست. از نظر اقلیمی با توجه به حجم بالای منبع رطوبت (دریای خزر) گرادیان بارندگی معکوس بوده و حدود ۱۴۰۰ میلی‌متر بارش در دشت و ۷۰۰ میلی‌متر بارش در ارتفاعات ثبت شده است. رسوبات آبرفتی این محدوده سه گستره سیلاب‌دشت را ایجاد کرده است. در ناحیه اول رسوبات آبرفتی بر روی سنگ کف سازند باکو، آبخوان با ظرفیت آبدهی مناسب، در ناحیه دوم رسوبات آبرفتی غرب و جنوب غرب لاهیجان تحت تأثیر رودخانه سفید رود و در ناحیه سوم که در بخش شمال لاهیجان تا رودسر واقع شده رسوبات آبرفتی با ضخامت کم بر روی رسوبات دریاچه‌ای حاوی آب شور ایجاد شده است. براساس بیلان منابع و مصارف آب در این محدوده مطالعاتی، حدود ۱۵۰ میلیون مترمکعب تخلیه چشمه‌ها در ارتفاعات، بخشی از جریان پایه سطحی را ایجاد کرده که باتوجه به افزایش بهره‌برداری در ارتفاعات منطقه، تخلیه از منابع آب زیرزمینی باتوجه به خصوصیات آبخوان و عدم مدیریت سبب شده تا هر سال افزایش یابد. افزایش حجم بهره‌برداری در کنار توسعه و کاهش آبدهی رودخانه‌ها سبب شده تا تعادل آبخوان به‌سمت کسری پیش رود. در کنار این مشکل کمی، توسعه، مشکلات کیفی در آبخوان را نیز به وجود آورده است. آبخوان این محدوده با وسعت ۸۴۷ کیلومتر مربع گسترش یافته و در سطح زیرین این آبخوان، آبخوان تحت‌فشار با وسعت ۵۸۲ کیلومتر مربع قرار دارد. بخش اعظم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی از آبخوان آبرفتی آزاد بوده و باتوجه به عمق کم آب زیرزمینی، تعداد زیاد چاه‌های غیرمجاز نیز در سال‌های اخیر به‌واسطه توسعه سکونتگاه‌ها حفر شده است. در شکل (۱) موقعیت آبخوان و گسترش آبرفت‌های این محدوده نمایش داده شده است.

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک

شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC که برای آبخوان‌های آبرفتی دارای کاربرد مناسبی بوده، از ۷ پارامتر عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه آبخوان (R)، محیط آبخوان (A)، جنس خاک (S)، شیب (T)، محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) تشکیل شده است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه.

Fig 1. Study Area.

عمق تا سطح آب زیرزمینی براساس عمق ثبت شده در چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان محاسبه می‌شود. از تلفیق لایه‌های رودخانه، هم‌باران و نفوذپذیری، میزان تغذیه آبخوان محاسبه می‌شود. با استفاده از لوگ‌های حفاری در محدوده آبخوان لاهیجان-فومنات، سه پارامتر محیط آبخوان، خاک و محیط غیراشباع در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از نقشه‌های DEM و استفاده از ابزارهای فضایی در محیط GIS نقشه شیب تهیه می‌شود. در نهایت نیز با استفاده از تقسیم میزان قابلیت انتقال آبخوان که با استفاده از آزمایشات پمپاژ محاسبه شده بر ضخامت آبخوان میزان هدایت هیدرولیکی تعیین می‌شود. در جدول ۱ رتبه‌بندی و وزن‌دهی پارامترهای این شاخص ارائه شده است. پس از تهیه پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی آسیب پذیری به‌روش دراستیک اقدام به تهیه نقشه آسیب پذیری شده است. در این روش از تلفیق پارامترهای هفت گانه بر اساس رابطه (۱) شاخص آسیب پذیری به‌دست می‌آید که در آن r ارزش کلاسه بندی شده هر پارامتر و w وزن هر یک از پارامترها است.

$$\text{DRASTIC-Index} = D_rD_w + R_rR_w + A_rA_w + S_rS_w + T_rT_w + I_rI_w + C_rC_w \quad (۱)$$

کلاسه بندی و ارزش‌گذاری کلاس‌های مختلف مربوط به هر کدام از پارامترها بر اساس روش استاندارد دراستیک در محیط GIS انجام می‌شود. تقسیم‌بندی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC برای آبخوان بصورت جدول (۲) ارائه می‌شود. کلاسه بندی و ارزش‌گذاری کلاس‌های مختلف مربوط به هر کدام از پارامترها بر اساس روش استاندارد دراستیک در محیط GIS انجام می‌شود. تقسیم‌بندی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC برای آبخوان بصورت جدول (۲) ارائه می‌شود.

جدول ۱. وزن و رتبه‌های شاخص آسیب پذیری دراستیک (Aller, 1987)

Table 1. Weights And Ratings of The DRASTIC Vulnerability Index.

Depth G.W (m) عمق تا آب زیرزمینی		Recharge (mm) تغذیه آبخوان		Slope (٪) شیب		Hydraulic conductivity (m/day) هدایت هیدرولیکی		Aquifer media محیط ابخوان		Vados Zone محیط غیراشباع		Soil خاک	
Class دامنه	Rank رتبه	Class دامنه	Rank رتبه	Class دامنه	Rank رتبه	Class دامنه	Rank رتبه	Class دامنه	Rank رتبه	Class دامنه	Rank رتبه	Class دامنه	Rank رتبه
0.1-1.5	10	0-50.8	1	0-2	10	0.4-4.1	1	Volcanic rock سنگ‌های آتشفشانی	2	Confining layer تحت فشار	1	Gravel گراول	10
1.5-4.6	9	50.8-101.6	3	2-6	9	4.1-12.3	2	Silt سیلت	3	Clay/Silt رس-سیلت	3	Sand شن	9
4.6-9.1	7	101.6-177.8	6	6-12	5	12.3-28.7	4	Sandstone +shale شن و شیل	5	Shale شیل	3	Pit پیت	8
9.1-15.2	5	177.8-254	8	12-18	3	28.7-41	6	Sandstone شن	6	Limestone آهک	3	Sandy loam شنی-لومی	7
15.2-22.8	3	>254	9	> 18	1	41-82	8	Conglomerate کنگومرا	8	Sandstone شن	6	Loam sandy لومی-شنی	6
22.8-30.4	2					>82	10	Sand and Gravel شن و گراول	8	Sand and Gravel شن و گراول	8	Loam لوم	5
> 30.4	1							Basalt بازالت	9	Basalt بازالت	9	Silt-clay سیلت-رس	4
								Karst کارست	10	Sand and clay شن و رس	10	Clay loam رس لوم	3
												Impact clay رس فشرده	2
												Non infiltration بدون نفوذ	1
5	Weight	4	Weight	1	Weight	3	Weight	3	Weight	5	Weight	2	Weight

جدول۲. طبقه‌بندی آبخوان از نظر آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص DRASTIC (Aller, 1987).

Table 2. Aquifer Vulnerability Classification Using The DRASTIC Index (Aller, 1987).

شاخص DRASTIC	کلاس	شاخص DRASTIC	کلاس
خیلی کم Very low	60>	زیاد High	160-200
کم Low	60-120	خیلی زیاد Very high	>200
متوسط Average	120-160		

تعریف ریسک بهره‌برداری

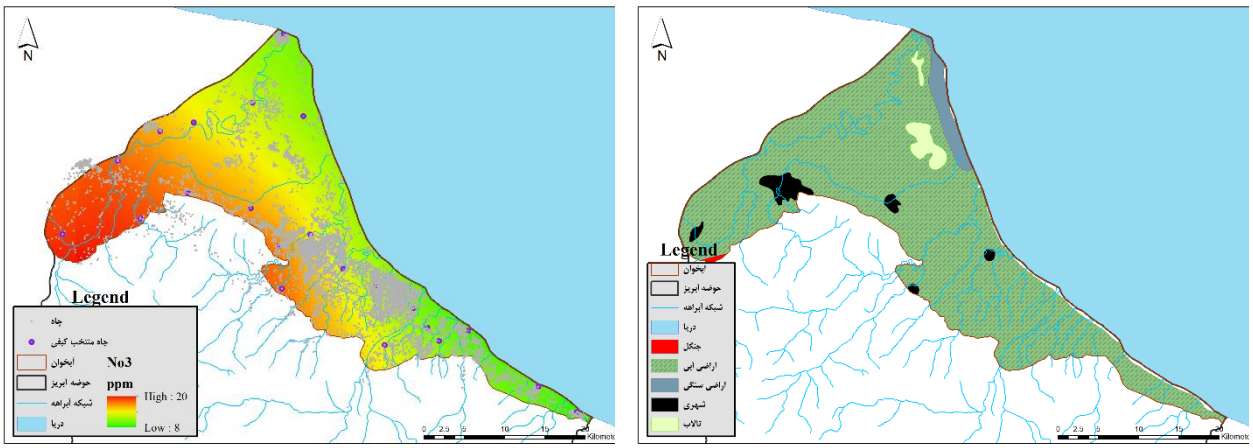
ریسک به‌طور کلی به احتمال وقوع یک حادثه منفی یا پدیده‌ای که باعث خسارت یا آسیب به سیستم‌های مختلف می‌شود، گفته می‌شود. در زمینه منابع آب زیرزمینی، ریسک مربوط به احتمال آسیب‌پذیری یا کاهش کیفیت منابع آب به دلیل عواملی مانند آلودگی، بهره‌برداری بیش از حد، تغییرات اقلیمی، یا تغییرات کاربری اراضی است. ریسک به‌طور معمول ترکیبی از دو مولفه است: احتمال وقوع یک حادثه و شدت پیامدهای آن. استفاده از مفهوم ریسک در ارزیابی منابع آب زیرزمینی از دو دیگاه بررسی دقیق تغییرات بالقوه کمی و کیفی و درنظرگرفتن متغیرها و عدم قطعیت متغیرها حائز اهمیت است. برای محاسبه ریسک، از مدل‌های مختلف استفاده می‌شود که در محاسبه از دو مفهوم احتمال × خطرپذیری استفاده می‌شود. این فرمول ساده و کاربردی است و به ما این امکان را می‌دهد که ریسک را بر اساس دو مولفه اصلی، یعنی احتمال وقوع یک رویداد و شدت یا خطر آن رویداد، ارزیابی کنیم.

$$R=P\times H \qquad (۲)$$

که در آن R ریسک، P احتمال وقوع یک رویداد خاص و H خطرپذیری یا شدت پیامدهای آن رویداد تعریف می‌شود. بررسی پارامترهای دربرگیرنده خصوصیات شاخص آسیب‌پذیری، مبتنی‌بر ذات یک آبخوان بوده و نقش عواملی نظیر کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی که مبتنی‌بر ذات آبخوان نیست، در آن مورد استفاده قرار نگرفته است. لذا برای ارزیابی شاخصی که مبتنی‌بر ذات آبخوان است، می‌بایست پارامتری که بیانگر این نوع ارتباط باشد مورد استفاده قرار گیرد. براین اساس مفهوم ریسک بهره‌برداری مبتنی بر سه فاکتور غلظت پارامتر کیفی (نیترات برای شاخص DRASTIC)، کاربری اراضی و تراکم منابع آب با استفاده از منطق فازی مورد استفاده قرار گرفت. در این شاخص نیترات به عنوان نقش آلاینده‌های ایجاد شده توسط بشر، کاربری اراضی نیز به عنوان تغییرات محیط ایجاد شده و تراکم منابع آب به عنوان پتانسیل بهره‌برداری تلفیق می‌شود. در شکل (۳) غلظت پهنه‌بندی شده نیترات، کاربری‌اراضی و موقعیت شبکه چاه‌های بهره‌برداری نمایش داده شده است. دوره آماری مورد تحلیل برای ارزیابی کاربری اراضی مربوط به نتایج استخراجی از وزارت نیرو در سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ است. مبنای تحلیل تراکم چاه‌های بهره‌برداری براساس دوره سوم آماربرداری سراسری منابع و مصارف آب در سال ۱۳۹۸ و تحلیل کیفی غلظت نیترات نیز برای این سال محاسبه شده است.

باتوجه به تغییرات ایجاد شده برای هریک از این سه فاکتور، سری زمانی این سه مولفه تهیه و با استفاده از تابع عضویت Fuzzy Large Than object مقدار ریسک محاسبه گردید.

$$\mu(x)=\frac{1}{1+\left(\frac{x}{f2}\right)^{-f1}} \qquad (۳)$$



شکل ۲. پهنه‌بندی کاربری‌اراضی، غلظت نیترات و شبکه چاه‌های برداشت.

Fig 2. Land Use Zoning, Nitrate Concentration, And Extraction Well Network.

که در آن $\mu(x)$: مقدار عضویت برای ورودی x، x: مقدار ورودی (مثلاً غلظت نیترات، تراکم منابع آب، یا دیگر پارامترها)، F1: پارامتر سرعت شیب که نحوه تغییر منحنی عضویت را تعیین می‌کند و F2: پارامتر آستانه میانه که نقطه‌ای است که تغییرات چشم‌گیر در مقدار عضویت اتفاق می‌افتد. در این رابطه پارامتر F1 تعیین می‌کند که منحنی عضویت چگونه سریع به ۱ می‌رسد. هرچه مقدار F1 بزرگ‌تر باشد، منحنی عضویت سریع‌تر به ۱ می‌رسد و نشان‌دهنده این است که تغییرات در مقادیر ورودی حساس‌تر و سریع‌تر تاثیر می‌گذارند. پارامتر F2 نقطه‌ای است که منحنی عضویت شروع به افزایش می‌کند. وقتی که مقدار ورودی از این آستانه بیشتر شود، مقدار عضویت سریعاً افزایش می‌یابد.

حداکثر ریسک ۱ و حداقل ریسک مقدار صفر در نظرگرفته شد. تغییرات مقدار ریسک بدین صورت تعریف گردید که در مناطقی که تغییرات کاربری و منابع آب در طی دوره آماری وجود نداشته و غلظت نیترات نیز بدون تغییر یا روند کاهشی داشته، کمترین میزان ریسک و در مناطقی که تغییرات کاربری وجود داشته و تعداد چاه‌های بهره‌برداری افزایش داشته و بالتبع آن غلظت نیترات نیز روند صعودی داشته است، بیشترین میزان ریسک وجود دارد. ریسک مورد تعریف باتوجه به درنظرگرفتن عوامل مرتبط با کمیت و کیفیت آب به عنوان ریسک زیست محیطی در نظرگرفته و تعریف شده است.

واسنجی شاخص آسیب‌پذیری

بررسی و مقایسه نتایج شاخص آسیب‌پذیری در مناطق با تنوع اقلیمی حاکی از تفاوت ساختاری در محاسبه شاخص آسیب‌پذیری است. در مناطق خشک، اهمیت پارامترهایی نظیر عمق آب زیرزمینی و تغذیه کم بوده و در مناطق مرطوب این پارامترها از اهمیت بالاتری برخوردار است. همچنین تأثیر خصوصیات سازندی آبخوان اعم از جنس آبرفت، جنس خاک و محیط غیراشباع در مناطق خشک باتوجه‌به خصوصیات خودپالایی و ضخامت، معمولاً بیشتر در مناطق خشک از اهمیت و حساسیت بالاتری برخوردار است. لذا تعریف و استفاده از وزن و رتبه‌های ثابت برای پارامترهای آسیب‌پذیری می‌تواند انحراف از نتایج مناسب را در برداشته باشد. بنابراین، رویکرد واسنجی در وزن و رتبه‌های شاخص آسیب‌پذیری اعم از هر نوع شاخص، به‌منظور استفاده کاربردی می‌بایست بکار برده شود.

توسعه روش‌های آماری و کامپیوتری سبب شده تا موضوع واسنجی در ابعاد جدید و با سرعت توسعه یابد. استفاده از روش‌هایی نظیر تحلیل آماری غلظت کیفی (Barzegar et al., 2020)، ویلکاکسون (Javadi et al., 2011)، تحلیل سلسله مراتبی (Thirumalaivasan et al., 2003)، داده

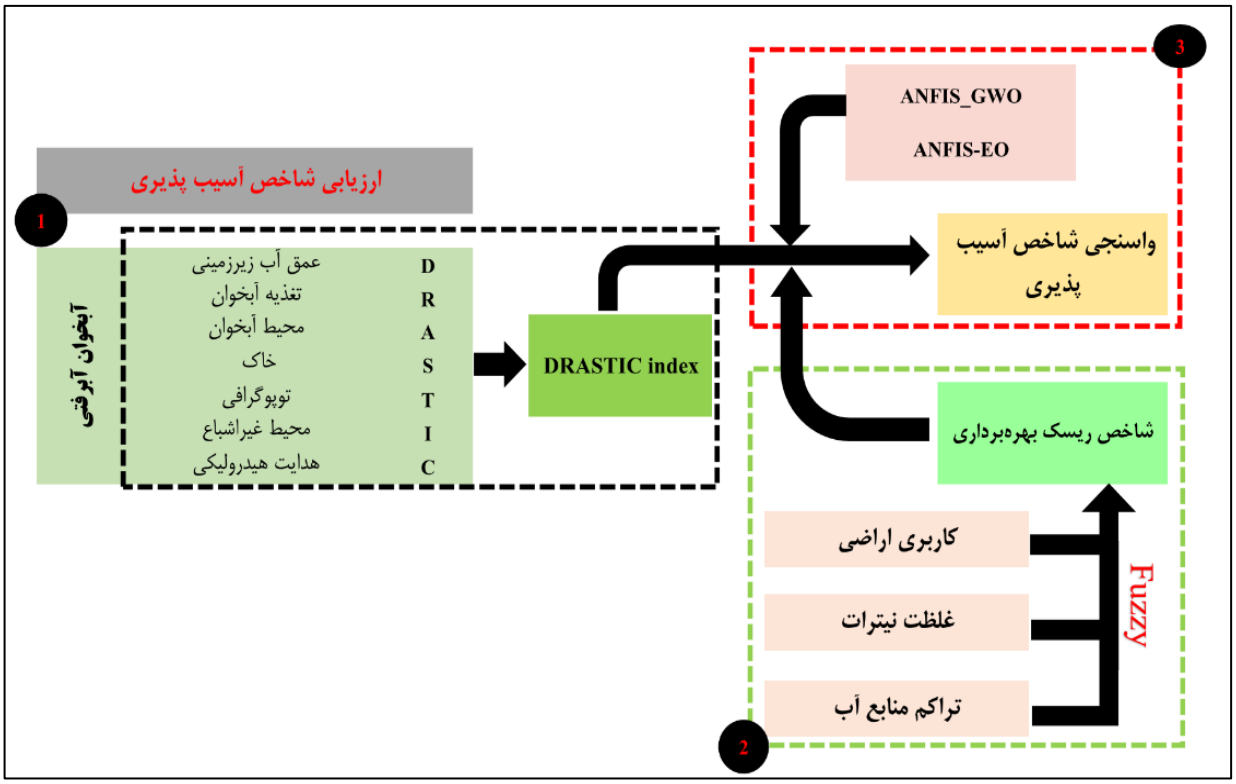
محور (Sorichetta et al., 2013)، مدل‌های عددی (Ameur et al., 2021)، هوش مصنوعی (Saida et al., 2017)، یادگیری ماشین (Elzain et al., 2022) و غیره در سالهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، رویکردهای مدیریت حجم زیاد داده و علاقه به استفاده از لایه‌های پنهان برای تشخیص الگوهای مختلف سبب شده است تا روش‌های یادگیری ماشین رشد و توسعه یابد. در روش یادگیری ماشین، الگوریتم‌های ساده‌تر و با سطح پیچیدگی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ این الگوریتم‌ها با استفاده از بخشی از داده‌ها آموزش داده شده تا قابلیت مناسبی را برای پردازش داده‌های جدید را داشته باشد.

استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری در حوزه‌های مختلف، به ویژه در تحلیل داده‌های پیچیده، ضروری به نظر می‌رسد. این روش‌ها توانایی تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها را دارند و قادرند به‌طور خودکار الگوهای پنهان و روابط غیرخطی میان متغیرها را شناسایی کنند، که در روش‌های سنتی به‌سختی قابل شناسایی هستند. به‌ویژه در سنجش آسیب‌پذیری‌ها، که ممکن است شامل داده‌های پیچیده و متنوعی از جمله اطلاعات اقتصادی، اجتماعی، محیطی و سیاسی باشد، یادگیری ماشین می‌تواند به‌طور مؤثری مدل‌هایی دقیق و انعطاف‌پذیر ایجاد کند که به تصمیم‌گیری‌های بهینه کمک کند. یکی از دلایل اصلی لزوم استفاده از این روش‌ها، تولنایی آن‌ها در پیش‌بینی دقیق‌تر و سریع‌تر نتایج، بر اساس داده‌های بزرگ و غیرخطی است. علاوه بر این، روش‌های یادگیری ماشین می‌توانند فرآیند واسنجی را خودکار کنند و به تحلیلگران کمک کنند تا به‌جای استفاده از مدل‌های سنتی، به ابزارهای پیشرفته‌تری دست یابند که قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده‌تری هستند. از این رو، استفاده از یادگیری ماشین در این زمینه نه تنها دقت و کارایی را افزایش می‌دهد، بلکه موجب تسریع در تصمیم‌گیری و پیش‌بینی آسیب‌ها و ریسک‌ها می‌شود.

این مطالعه با به‌کارگیری رویکرد یادگیری ماشین به‌منظور واسنجی وزن و رتبه‌های شاخص آسیب‌پذیری دراستیک مورد استفاده قرار گرفته است. براین اساس از تلفیق روش شبیه‌سازی ANFIS با دو روش بهینه‌سازی گرگ‌خاکستری (GWO) و پنگوئن امپراتور (EO) واسنجی انجام گرفت. براین اساس با استفاده از شرایط اولیه وزن و رتبه‌ها شاخص DRASTIC، همبستگی بین نتایج این شاخص با غلظت نیترات محاسبه گردید. در مدل‌های یادگیری ماشین پهنه‌بندی کیفی ریسک و پارامترهای کیفی به عنوان متغیر مستقل و وزن و رتبه‌های در نظرگرفته شده در مدل بهینه‌سازی به عنوان متغیر تصمیم و شاخص آسیب‌پذیری به عنوان متغیر وابسته در نظرگرفته شده است. در صورت پایین بودن میزان همبستگی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین با درنظرگرفتن تابع هدف حداکثرسازی میزان همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و میزان غلظت نیترات انجام می‌گیرد.

روش پژوهش

در این مطالعه، روش پژوهش مبتنی بر هدف در ۳ گام اصلی تعریف گردید. در گام اول شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC در آبخوان لاهیجان-فومنات که در بخش جنوبی دریای خزر مبتنی بر ۷ پارامتر محاسبه می‌گردد. در گام دوم مفهوم ریسک بهره‌برداری مبتنی بر ۳ پارامتر کاربری‌اراضی، غلظت نیترات و تراکم منابع آب با استفاده از روش فازی تعریف می‌شود. در گام سوم واسنجی شاخص آسیب‌پذیری با مفهوم ریسک تعریف شده انجام می‌گیرد. برای واسنجی از روش یادگیری ماشین ANFIS-GWO و ANFIS-EO استفاده گردید. در شکل ۳ مراحل این پژوهش ارائه شده است.



شکل ۳. مراحل پژوهش.

Fig 3. Research Methodology.

نتایج و بحث

محاسبه شاخص آسیب‌پذیری دراستیک

پهنه‌بندی و رتبه‌دهی پارامترهای ۷ گانه شاخص آسیب‌پذیری دراستیک مبتنی بر آمار و اطلاعات موجود تحلیل و آنالیز شد.

در شکل ۴ تا ۱۰ پارامترهای ۷ گانه شاخص آسیب‌پذیری و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دراستیک ارائه شده است.

باتوجه به نقش عوامل تشکیل‌دهنده شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC، پهنه‌بندی و رتبه‌دهی نشان داد که عمق آب زیرزمینی بطور متوسط در این آبخوان کم بوده و روند تغییرات مکانی نیز بگونه‌ای بوده که بخش شمال و شمالغرب آبخوان دارای عمق کم است.

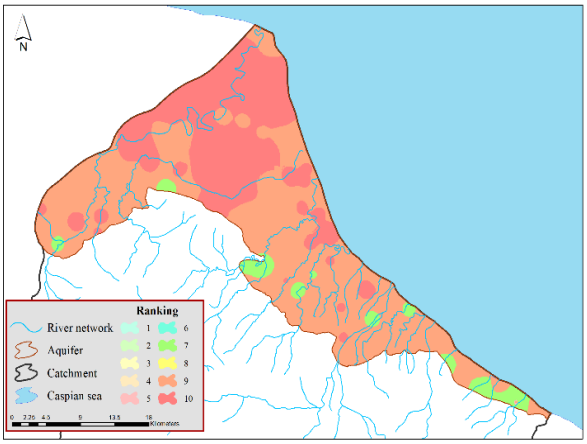
میزان تغذیه آبخوان باتوجه به وجود جریانات سطحی دائم، حجم بالای جریانات برگشتی ناشی از مصارف و بالابودن میزان بارش در آبخوان دارای تنوع رتبه‌دهی بوده و بخش شمال و شمال غرب دارای بیشترین میزان رتبه و بخش‌های جنوبی و شرقی دارای رتبه‌های کمتر است.

تنوع جنس خاک، محیط آبخوان و لایه غیراشباع باتوجه به لوگ‌های حفاری در منطقه دارای تنوع بالایی نبوده و بخش‌های منتهی به دریا دارای ساختار درشت‌دانه‌تری نسبت به سایر بخش‌ها است.

باتوجه به کاربری‌اراضی و قابلیت مناسب کشاورزی در منطقه، لایه‌بندی خاک منطقه بگونه‌ای است که رتبه‌دهی بالایی در آبخوان وجود دارد.

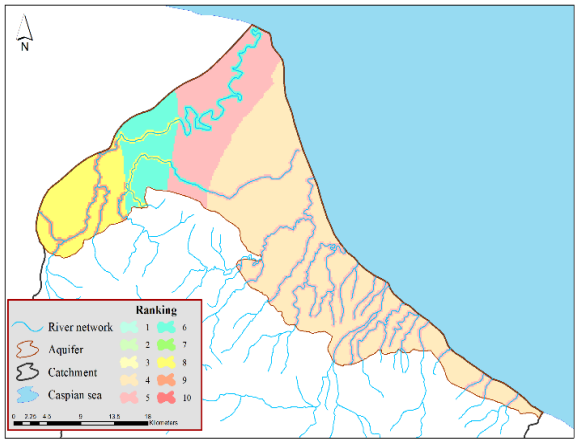
شیب عمومی آبخوان تقریباً مسطح بوده و باتوجه به ساختار محیط منطقه، هدایت هیدرولیکی آبخوان تحلیل و رتبه‌دهی بین ۶ تا ۸ انجام شد.

در نهایت، با تلفیق ۷ پارامتر آسیب‌پذیری مقدار شاخص بین ۱۱۹ تا ۱۷۹ بدست آمد (شکل ۱۱).



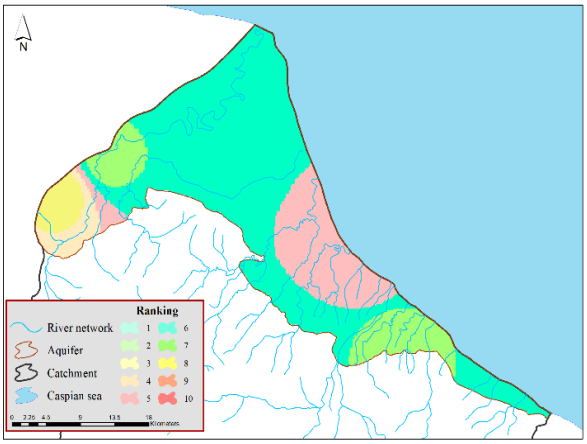
شکل ۴. پهنه‌بندی پارامتر عمق آب زیرزمین

Fig 4. Zoning of Groundwater Depth Parameter



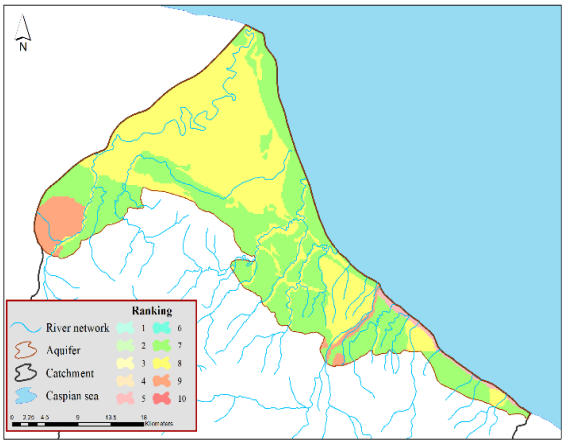
شکل ۵. پهنه‌بندی پارامتر تغذیه

Fig 5. Recharge Parameter Zoning



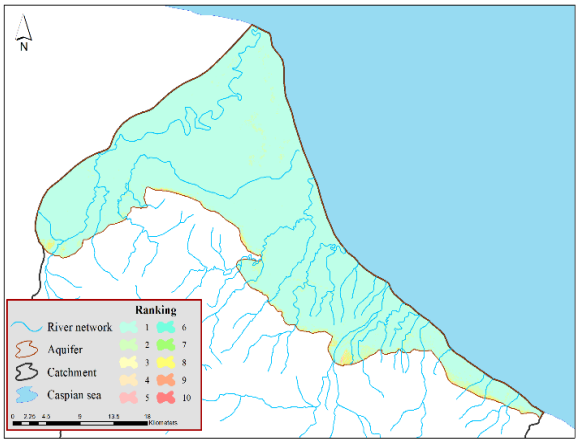
شکل ۶. پهنه‌بندی پارامتر محیط آبخوان

Fig 6. Aquifer Media Parameter Zoning.



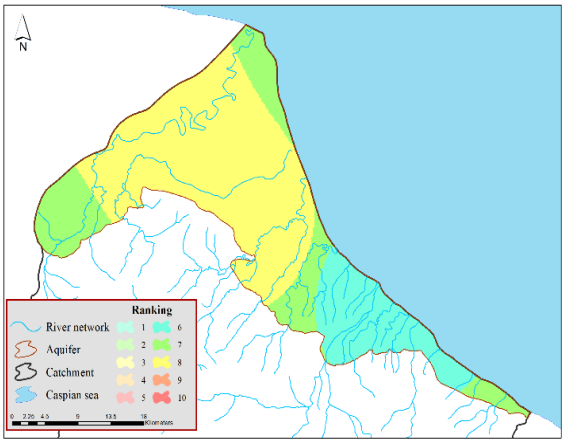
شکل ۷. پهنه‌بندی پارامتر خاک

Fig 7. Soil Parameter Zoning.



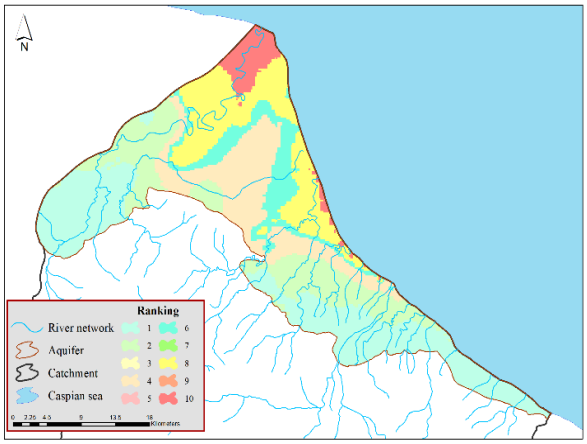
شکل ۸. پهنه‌بندی پارامتر توپوگرافی

Fig 8. Topography Parameter Zoning.



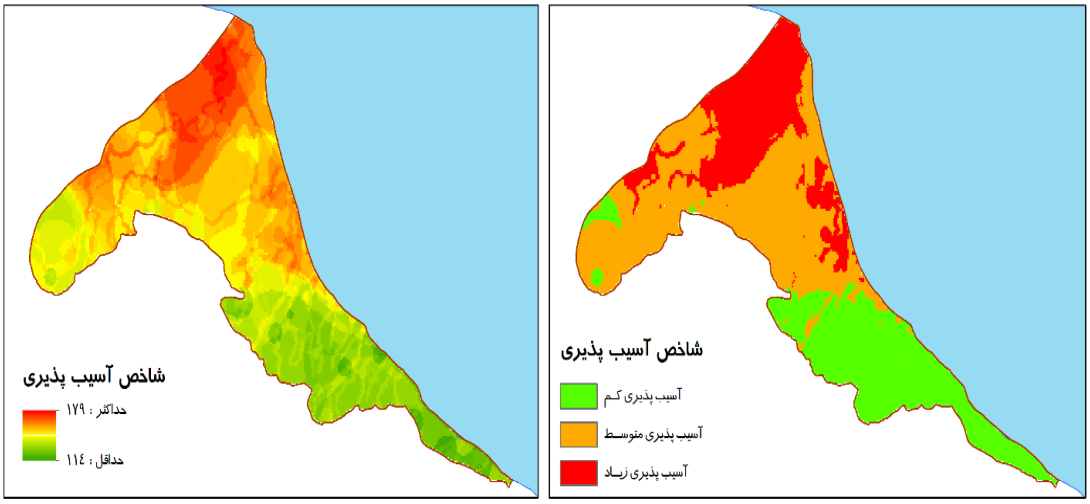
شکل ۹. پهنه‌بندی پارامتر محیط غیراشباع

Fig 9. Vadose Parameter Zoning.



شکل ۱۰. پهنه‌بندی پارامتر هدایت هیدرولیکی

Fig 10. Hydraulic Conductivity Parameter Zoning.



شکل ۱۱. پهنه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در آبخوان لاهیجان-فومنات

Fig 11. Zoning of The DRASTIC Vulnerability Index in The Lahijan-Foumanat Aquifer.

مقدار شاخص DRASTIC محاسبه شده نشان دهنده میزان حساسیت سفره به آلودگی بود، به این ترتیب که اعداد بزرگ‌تر تعیین کننده استعداد بیشتر سفره آب زیرزمینی برای آلوده شدن است.

بیشترین میزان حساسیت و آسیب‌پذیری مربوط به بخش شمالی و شمال غرب آبخوان بوده و بخش‌های جنوبی و شرقی حداقل میزان آسیب‌پذیری را دارد.

بررسی مقدار آسیب‌پذیری در این نواحی، با کاربری اراضی که بیشتر مبتنی بر فعالیت‌های کشاورزی و توسعه شهری تمرکز داشته نیز همخوانی دارد (Bordbar et al., 2024; Subbarayan et al., 2024; Taghavi et al., 2023).

همچنین براساس نتایج مشخص گردید که ۲۲/۶ درصد آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری بالا و حساس برای توسعه است.

بررسی نتایج شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC نشان داد که بخش شمالی این آبخوان نسبت به سایر مناطق دارای اسیب‌پذیری بالاتری بوده و این موضوع باتوجه به عمق آب زیرزمینی و جنس آبخوان از نقطه نظرات مختلف اعم از خاک، محیط آبخوان و محیط غیراشباع نیز وجود دارد (Guo et al., 2023). این منطقه دارای توسعه کشاورزی و شهرنشینی بالاتری بوده و براین اساس نتایج به واقعیت زمینی نیز همخوانی مناسبی دارد.

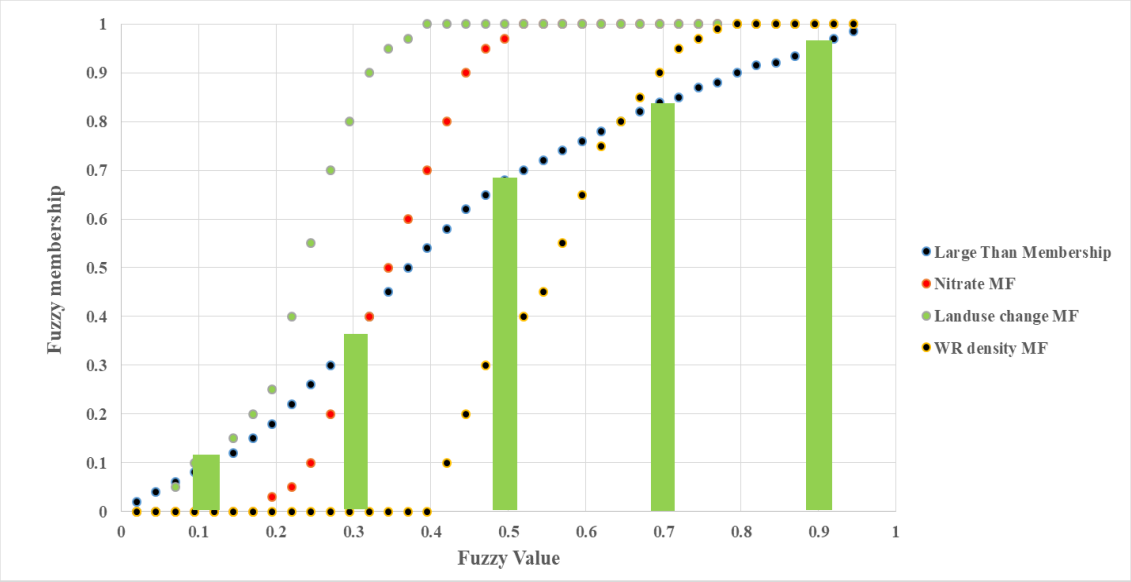
ریسک بهره‌برداری

ریسک بهره‌برداری به عنوان یک مفهوم جدید برای واسنجی آسیب‌پذیری با استفاده از منطق فازی تعریف گردید. سه تابع عضویت برای ۳ پارامتر غلظت نیترات، تغییرات کاربری‌اراضی و تراکم منابع آب با روش میانگین وزنی محاسبه و در نهایت نقشه ریسک بهره‌برداری بصورت فازی تهیه شد. مقادیر تعریف شده برای تابع عضویت پارامتر نیترات براساس تابع عضویت در دو مقدار f1 (Spread) و f2 (Midpoint) مطابق جدول ۱ تعریف شد. مقدار نیترات بالاتر از ۱۰ میلیگرم در لیتر مقدار عضویت ۵٪ آغاز شده و تا غلظت ۳۰ میلیگرم در لیتر به عنوان کران نهایی یا مقدار عضویت ۱۰۰ درصد تعریف شد. تغییرات کاربری‌اراضی در منطقه نیز بدین صورت تعریف گردید که تغییر در حذف اراضی طبیعی و افزوده شدن اراضی کشاورزی یا شهری به میزان ۲۰ درصد به عنوان حد متوسط (Midpoint) و پس از تغییر ۴۰ درصد کاربری اراضی، حداکثر میزان عضویت (۱۰۰ درصد) محاسبه گردید. بیش از ۴۰ درصد تغییرکاربری به عنوان حداکثر مقدار ریسک معرفی می‌شود. چگالی منابع آب در منطقه نیز باتوجه به حجم بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی به نسبت مساحت آبخوان بصورت بی‌بعد محاسبه شده و افزایش این تراکم به مفهوم فشار بهره‌برداری خواهد بود. متوسط چگالی ۲۵ درصد و حد بالای این چگالی بیش از ۳۰ درصد محاسبه شده است. با تلفیق این سه تابع عضویت بصورت مکانی مطابق شکل (۱۲)، میزان ریسک بهره‌برداری محاسبه شد.

جدول ۳. مقادیر تابع عضویت سه پارامتر ریسک بهره‌برداری

Table Membership Function Values for the Three Exploitation Risk Parameters

پارامتر	F1 - Spread	F_2 - Midpoint	F_2- patterns
غلظت نیترات Nitrate	20	0.35	20 ppm
کاربری اراضی Land use	40$	0.27	20%
تراکم منابع آب W.R density	0.2	0.6	0.25



شکل ۱۲. تابع عضویت سه پارامتر ریسک بهره‌برداری.

Fig 12. Membership Functions For The Three Exploitation Risk Parameters.

بررسی تابع عضویت در سه پارامتر ریسک نشان می‌دهد که درجه همگرایی غلظت نیترات نسبت به دو پارامتر دیگر بیشتر بوده و افزایش غلظت نیترات، میزان ریسک را بیشتر افزایش می‌دهد. دو تابع عضویت چگالی منابع آب و تغییر کاربری اراضی درجه یکسانی از نظر وزن تابع عضویت دارد.

واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری

یکی از رویکردهای نوین در واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مبتنی‌بر شاخص‌های آماری نظیر همبستگی جهت ارزیابی میزان دقت نتایج است. در این مطالعه از تلفیق روش شبیه‌سازی ANFIS و دو روش بهینه‌سازی تلفیقی EO و GWO استفاده گردید. در این شرایط ۲ مدل یادگیری ماشین ANFIS-EO و ANFIS-GWO مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. برای واسنجی شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC، هر یک بصورت مجزا براساس دو متغیر تصمیم وزن و رتبه هر پارامتر با تعریف تابع هدف حداکثرسازی همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و ریسک بهره‌برداری آنالیز گردید. به منظور تعریف محدوده و کران تغییرات وزن و رتبه‌های شاخص آسیب‌پذیری در دوره واسنجی، محدودیت وزن تعریف شده بگونه‌ای است که وزن بین مقدار ۱ تا ۷ و رتبه بین ۱ تا ۱۰ در تغییر باشد. باتوجه به تعریف ریسک بهره‌برداری، برای اولین بار جهت واسنجی شاخص‌های آسیب‌پذیری از این مفهوم استفاده شد. همچنین برای مقایسه نتایج واسنجی استفاده از مفهوم ریسک، از غلظت نیترات نیز استفاده شد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. ساختار شبیه‌سازی ANFIS شامل غلظت نیترات یا ریسک به عنوان عامل محدود کننده، پارامترهای ۷ گانه شاخص آسیب‌پذیری که وزن و رتبه‌های آنها به عنوان متغیرتصمیم به عنوان ورودی تعریف شد. ۵ قانون فازی Gaussian در این ساختار تعریف که تقسیم داده‌ها به نسبت ۷۰٪ آموزش، ۱۵٪ اعتبارسنجی و ۱۵٪ آزمون انجام شد. نرخ یادگیری ۰/۰۱ و معیار توقف تغییر کمتر از ۰/۰۰۰۰۱ در خطای RMSE در ۱۰۰ دوره متوالی بود.

جدول ۴. ارزیابی همبستگی واسنجی شاخص آسیب‌پذیری.

Table 4. Calibration Correlation Assessment of The Vulnerability Index.

	DRASTIC	DRASTIC-ANFIS-GWO	DRASTIC-ANFIS-EO
نیترات No_3	0.35	0.61	0.65
ریسک Risk	0.32	0.72	0.75

نتایج محاسباتی نشان داد که بر مبنای همبستگی تعریف شده، شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC رشد مناسبی داشته و دقت واسنجی در این شرایط افزایش مناسبی دارد. نتایج اولیه نشان داد که اگرچه میزان همبستگی قبل از واسنجی مناسب نبوده، اما واسنجی انجام شده حاکی از افزایش کارایی نتایج است. میزان عدم قطعیت نتایج باتوجه به ضریب تغییرات کم وزن و رتبه‌ها نسبت به قبل از دوره واسنجی محاسبه شده است. همچنین برای ارزیابی نااطمینانی، از روش bootstrap با ۱۰۰ تکرار استفاده شد و انحراف معیار ضریب همبستگی کمتر از ۰/۰۳ به‌دست آمد که بیانگر پایداری مدل است. این روش‌ها باتوجه به هدف غایی این روش‌ها، مناسب ارزیابی می‌شود. بهینه‌سازی برای وزن پارامترهای دو شاخص در محدوده تغییرات وزن بین ۱ تا ۷ و رتبه‌ها بین ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شد. باتوجه به نتایج بدست آمده در جدول (۵) وزن و رتبه‌های واسنجی شده با روش منتخب ANFIS-EO برای شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC ارائه شده است.

جدول ۵. وزن و رتبه‌های بهینه شده شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC

Table 5. Optimized Weights And Ratings of The DRASTIC Vulnerability Index.

پارامتر Parameters	وزن اولیه First Weight	وزن واسنجی شده با روش ANFIS_EO	رتبه اولیه First rank	رتبه واسنجی شده با ANFIS-EO
عمق آب زیرزمینی Depth groundwater	5	6.7	10	10
			9	9.5
			7	7.6
			5	6.2
تغذیه آبخوان recharge	4	5.1	9	9.4
			8	8.4
			6	6.7
			5	5.5
			4	4.3
محیط آبخوان Aquifer media	3	2.8	7	6.2
			6	5.7
			5	4.6
			4	3.2
			3	2.9
خاک Soil	2	3.1	9	8.5
			8	8.2
			7	7.6
			5	5.3
			4	4.3
توپوگرافی Slope	1	1.2	5	4.7
			4	4.2
			3	3.5
			2	3.1
			1	2.2
محیط غیراشباع Vados zone	5	5.8	8	8.6
			7	7.4
			6	7.2
هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity	3	3.8	10	10
			8	8.9
			6	7.2
			4	5.3
			2	3.1
			1	2.2

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در شاخص واسنجی شده DRASTIC ۶ پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان، محیط خاک، محیط غیراشباع، شیب و هدایت هیدرولیکی با افزایش وزن و تنها محیط آبخوان با کاهش وزن بهینه شده است.

بررسی اجمالی رتبه‌ها نیز حاکی از همین روند افزایشی است.

همچنین بیشترین وزن تخصیص داده شده به عمق آب زیرزمینی با مقدار ۶/۷ و کمترین وزن مربوط به توپوگرافی با وزن ۱/۲ است.

میزان اهمیت عمق آب زیرزمینی و محیط غیراشباع باتوجه به حساسیت بالای آبخوان مشهود است.

عمق کم آب زیرزمینی پتانسیل بالای آسیب‌پذیری را داشته و این موضوع باتوجه به محیط درشت‌دانه غیراشباع پتانسیل آسیب‌پذیری را افزایش می‌دهد.

همین موضوع سبب می‌شود تا در نقطه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری، پهنه‌های آسیب‌پذیر با کلاس بالا افزایش داشته باشد.

حساسیت شاخص آسیب‌پذیری مبتنی بر پارامترهای این شاخص براساس روش حذفی مورد آنالیز حساسیت قرار

گرفت که در این روش در هر مرحله یکی از پارامترها حذف و ارزیابی میزان همبستگی انجام گرفت که نتایج نشان داد که عمق آب زیرزمینی بیشترین حساسیت و شیب کمترین حساسیت را دارد.

میزان همبستگی در شرایط حذف هریک از پارامترهای شاخص آسیب‌پذیری بصورت جدول (۶) ارائه شده است. بالابودن میزان همبستگی بیانگر اهمیت کم پارامتر شاخص است.

جدول ۶. نتایج آنالیز حساسیت شاخص واسنجی شده دراستیک.

Table 6. Sensitivity Analysis Results of The Calibrated DRASTIC Index.

پارامتر Parameters	D	R	A	S	T	I	C
ضریب همبستگی Corrolation	0.55	0.64	0.68	0.7	0.73	0.62	0.68

نتیجه‌گیری

استفاده از رویکرد آسیب‌پذیری به عنوان یک ابزار در تصمیم‌گیری و تعیین پتانسیل توسعه در مناطق مختلف شناخته می‌شود. این موضوع باتوجه به در نظرگرفتن مجموعه‌ای از پارامترهای موثر در تحلیل و انتقال آلودگی حائز اهمیت است. مطالعات مختلف از نظر کیفی بیانگر کارایی مناسب شاخص‌ها برای بیان مفهوم آسیب‌پذیری بوده است. در این مطالعه از شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC باتوجه به مطالعات متعدد که از کارایی بالایی برخوردار بوده استفاده گردید. نتایج پهنه‌های آسیب‌پذیر نشان داد که فعالیت‌های کشاورزی در بخش‌های عمده آبخوان تاثیر زیادی بر میزان آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص DRASTIC داشته است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از شاخص DRASTIC نشان داد که بخش‌های شمال و شمال غربی آبخوان دارای حساسیت بیشتری بواسطه توسعه کشاورزی و تمرکز جمعیت است. بررسی وزن و رتبه‌های واسنجی شده نشان داد که این مقادیر برای ۶ پارامتر شاخص DRASTIC افزایشی بوده است. باتوجه به مفهوم ذاتی بودن آسیب‌پذیری، پارامتر ریسک بهره‌برداری بصورت فازی مبتنی بر سه پارامتر غلظت نیترات، تغییرات کاربری اراضی وچگالی منابع آب آنالیز گردید. نتایج واسنجی با استفاده از مفهوم ریسک، حاکی از برتری این مفهوم در مقابل غلظت نیترات بکار برده شده نسبت به مطالعات قبلی داشته و میزان همبستگی در این شرایط افزایش و رشد مناسبی داشته است. در این رویکردها تابع هدف حداکثرسازی همبستگی بین ریسک و شاخص آسیب‌پذیری بوده و متغیر تصمیم، وزن و رتبه‌های هر شاخص است. در نتیجه، واسنجی وزن و رتبه‌های شاخص آسیب‌پذیری با هدف افزایش دقت نتایج و شناسایی عرصه‌های حساس انجام گرفت. نتایج واسنجی نشان داد که میزان دقت روش‌های یادگیری ماشین مناسب بوده و عدم قطعیت نتایج همبستگی محسوس نیست که مدل یادگیری ماشین ANFIS-EO با حداکثر میزان همبستگی برای شاخص آسیب‌پذیری انتخاب شد. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از مفهوم ریسک بهره‌برداری این قابلیت را ایجاد می‌کند که ذات آبخوان برای واسنجی آسیب‌پذیری بیشتر، مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

Aller. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution-Google Books*.

Ameur, M., Aouiti, S., Hamzaoui-Azaza, F., Cheikha, L. Ben, & Gueddari, M. (2021). Vulnerability assessment, transport modeling and simulation of nitrate in groundwater using SI method and modflow-MT3DMS software: case of Sminja aquifer, Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, *80*(6), 1–16. https://doi.org/10.1007/S12665-021-

quality index using data-driven models. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(6), 8174–8190. https://doi.org/10.1007/S11356-021-16158-6

Nejatian, N., abbaspour, M., Javidan, P., Nia, M. Y., Shacheri, F., Azizi, H., Nia, M. Y., Pazoki, A., Pazoki, M., Amiri, M. J., & Abbasi, S. (2024). Evaluation of the vulnerability and pathways of groundwater pollution in the Zanjanrud river basin by an integrated modeling approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, *10*(2), 2295–2308. https://doi.org/10.1007/S40808-023-01897-X

Podlasek, A., Koda, E., Vaverková, M. D., Rabek, P., Bujakowski, F., & Pietruszewski, W. (2025). Groundwater vulnerability modelling in landfill-affected areas: From conventional GOD and DRASTIC models to the novel DRASTIC-LPBM approach. *Engineering Geology*, *357*, 108347. https://doi.org/10.1016/J.ENGGEO.2025.108347

Saida, S., Tarik, H., Abdellah, A., Farid, H., & Hakim, B. (2017). Assessment of Groundwater Vulnerability to Nitrate Based on the Optimised DRASTIC Models in the GIS Environment (Case of Sidi Rached Basin, Algeria). *Geosciences 2017, Vol. 7, Page 20*, *7*(2), 20. https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES7020020

Sorichetta, A., Ballabio, C., Masetti, M., Robinson, G. R., & Sterlacchini, S. (2013). A Comparison of Data-Driven Groundwater Vulnerability Assessment Methods. *Groundwater*, *51*(6), 866–879. https://doi.org/10.1111/GWAT.12012

Subbarayan, S., Thiyagarajan, S., Karuppannan, S., & Panneerselvam, B. (2024). Enhancing groundwater vulnerability assessment: Comparative study of three machine learning models and five classification schemes for Cuddalore district. *Environmental Research*, *242*, 117769. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.117769

Taghavi, N., Niven, R. K., Kramer, M., & Paull, D. J. (2023). Comparison of DRASTIC and DRASTICL groundwater vulnerability assessments of the Burdekin Basin, Queensland, Australia. *Science of The Total Environment*, *858*, 159945. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159945

Taheri, K., Missimer, T. M., Maleki, A., Omidipour, R., & Majidipouri, F. (2024). Assessment of alluvial aquifer intrinsic vulnerability by a generic DRASTIC model: a discussion on data adequacy and pragmatic results. *Environment, Development and Sustainability*, *26*(6), 15125–15162. https://doi.org/10.1007/S10668-023-03240-X

Thirumalaivasan, D., Karmegam, M., & Venugopal, K. (2003). AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modelling & Software*, *18*(7), 645–656. https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00051-3

09491.

Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A., Norallahi, S., Inam, A., Adamowski, J., Alizadeh, M. R., & Bou Nassar, J. (2020). Modification of the DRASTIC Framework for Mapping Groundwater Vulnerability Zones. *Groundwater*, *58*(3), 441–452. https://doi.org/10.1111/GWAT.12919.

Bordbar, M., Rezaie, F., Bateni, S. M., Jun, C., Kim, D., Busico, G., Moghaddam, H. K., Paryani, S., Panahi, M., & Valipour, M. (2024). Global Review of Modification, Optimization, and Improvement Models for Aquifer Vulnerability Assessment in the Era of Climate Change. *Current Climate Change Reports 2024 9:4*, *9*(4), 45–67. https://doi.org/10.1007/S40641-023-00192-2

Elzain, H. E., Chung, S. Y., Senapathi, V., Sekar, S., Lee, S. Y., Roy, P. D., Hassan, A., & Sabarathinam, C. (2022). Comparative study of machine learning models for evaluating groundwater vulnerability to nitrate contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *229*, 113061. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.113061

George, N. J., Agbasi, O. E., Umoh, A. J., Ekanem, A. M., Udosen, N. I., Thomas, J. E., Aka, M. U., & Ejepu, J. S. (2025). Enhanced contamination risk assessment for aquifer management using the geo-resistivity and DRASTIC model in alluvial settings. *Cleaner Water*, *3*, 100060. https://doi.org/10.1016/J.CLWAT.2024.100060

Guo, X., Yang, Z., Li, C., Xiong, H., & Ma, C. (2023). Combining the classic vulnerability index and affinity propagation clustering algorithm to assess the intrinsic aquifer vulnerability of coastal aquifers on an integrated scale. *Environmental Research*, *217*, 114877. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114877

Javadi, S., Kavehkar, N., Mohammadi, K., Khodadadi, A., & Kahawita, R. (2011). Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International*, *36*(6), 719–732. https://doi.org/10.1080/02508060.2011.610921

Kardan Moghaddam, H., Rahimzadeh Kivi, Z., Bahreinimotlagh, M. and Moghddam, H.K., 2022. Evaluation of the groundwater resources vulnerability index using nitrate concentration prediction approach. *Geocarto International*, *37*(6), pp.1664-1680.

Lakshminarayanan, B., Ramasamy, S., Anuthaman, S. N., & Karuppanan, S. (2021). New DRASTIC framework for groundwater vulnerability assessment: bivariate and multi-criteria decision-making approach coupled with metaheuristic algorithm. *Environmental Science and Pollution Research 2021 29:3*, *29*(3), 4474–4496. https://doi.org/10.1007/S11356-021-15966-0

Najafzadeh, M., Homaei, F., & Mohamadi, S. (2022). Reliability evaluation of groundwater