



## Potential Assessment of Areas Susceptible to Groundwater Pollution (Case Study: Razavar Basin)

Mehrnoosh Ghadimi<sup>1\*</sup> , Farkhunde Moradi<sup>2</sup> 

1. Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding author).  
Email: [Ghadimi@ut.ac.ir](mailto:Ghadimi@ut.ac.ir)  
2. Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.  
Email: [farkhondemoradi5@gmail.com](mailto:farkhondemoradi5@gmail.com)

### Article Info

**Article Type:** Research Article

#### Article History:

Received: 19 October 2025  
Revised: 14 December 2025  
Accepted: 20 January 2026  
Published: 29 March 2026

Use Your Device to Scan and Read the Article Online



**Keywords:** Karst Areas, Environmental Pollution, Groundwater Resources, Razavar Basin.

### ABSTRACT

Karstic areas are at risk of groundwater contamination due to their high permeability. One of the areas facing this problem is the Razavar basin between Kurdistan and Kermanshah provinces. Given the importance of the issue, this study has identified areas susceptible to groundwater contamination in the Razavar basin. In this research, the 1:100,000 digital geological map layer of the region, the 30-meter SRTM elevation model, and Sentinel 1 satellite images were used as the most important research data. The most important research tools were ArcGIS, TerrSet, and Google Earth Engine. Also, in this research, the AHP, WLC, and OWA analysis models were used to identify areas susceptible to groundwater pollution. Based on the results obtained from the WLC model, 15.9 and 30.5 percent of the basin are in the very high and high vulnerability potential classes, respectively. In addition, based on the results obtained from the OWA model, 12.1 and 27.3 percent of the basin are in the very high and high vulnerability potential classes, respectively. The results of the spatial analysis of the pollution-prone areas also showed that, in a general trend, the middle areas of the Razavar basin have a high potential for groundwater pollution due to the type of lithology, proximity to the river and main roads, as well as the low altitude and slope.

**Cite this article:** Ghadimi, M., & Moradi, F. (2026). Potential Assessment of Areas Susceptible to Groundwater Pollution (Case Study: Razavar Basin). *Environmental Research in Mountainous Regions*, 2(1), 1-15. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.144377.1034>



© The Author(s) retain the copyright

**Publisher:** University of Kurdistan

## Extended Abstract

### Introduction

Groundwater resources, particularly karst aquifers, play a crucial role in supplying water for domestic, agricultural, and industrial purposes. However, characteristics such as high secondary porosity, complex networks of fractures, joints, and underground conduits, high flow velocities, and short residence times increase the vulnerability of these resources to contamination. In karst environments, pollutants originating from domestic and industrial wastewater and agricultural runoff can rapidly infiltrate aquifers, thereby threatening groundwater quality. The Razavar Watershed, located between Kamyaran and Kermanshah, is considered one of the areas in the Zagros region susceptible to groundwater contamination due to its karst formations, high density of settlements, agricultural and industrial activities, and inadequate wastewater collection and treatment systems. Despite the importance of these resources, comprehensive studies on the vulnerability and contamination potential of aquifers in this watershed remain limited and have mainly focused on water-quality assessment or cross-sectional analyses. Therefore, this study aimed to assess the contamination potential and identify areas susceptible to groundwater contamination in the Razavar Watershed. To this end, hydrogeological, geological, and land-use data were integrated to evaluate different zones in terms of their degree of vulnerability and contamination potential, and an aquifer vulnerability map was subsequently developed. The results of this assessment can provide a scientific basis for identifying critical areas, prioritizing protective measures, and strengthening groundwater monitoring and sustainable management programs in the Razavar Watershed.

### Methodology

In this study, a 1:100,000-scale geological map, a 30-m SRTM digital elevation model (DEM), and Sentinel-1 satellite imagery were used to identify areas vulnerable to groundwater contamination. Data processing was performed using ArcGIS, TerrSet, and Google Earth Engine. Eight parameters, including lithology, distance from faults, elevation, slope, distance from settlements, major roads, and rivers, and

land use, were selected for vulnerability assessment and standardized on a scale from 0 to 1. Subsequently, the criteria were weighted based on expert judgment using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and the resulting weights were applied to the thematic layers in Expert Choice. The weighted layers were then integrated in TerrSet using two multi-criteria decision-making methods, Weighted Linear Combination (WLC) and Ordered Weighted Averaging (OWA), to generate vulnerability maps. The simultaneous application of these two methods was intended to compare the results and increase confidence in identifying areas susceptible to groundwater contamination.

### Results and Discussion

The results of weighting the criteria using the Analytic Hierarchy Process (AHP) showed that distance from rivers and lithology, with weights of 0.212 and 0.178, respectively, were the most important factors influencing the groundwater contamination potential in the Razavar Watershed. The integration of the thematic layers using the WLC and OWA methods indicated that the central parts of the watershed had the highest contamination potential due to susceptible lithology, proximity to rivers and major roads, as well as lower elevation and slope. Quantitative results showed that, under the WLC method, areas with high and very high contamination potential covered 712 km<sup>2</sup>, equivalent to 46.3% of the watershed area, whereas under the OWA method, these areas covered 606 km<sup>2</sup>, equivalent to 39.4%. In contrast, areas with low and very low contamination potential were estimated at 396 km<sup>2</sup> (25.8%) using WLC and 402 km<sup>2</sup> (26.2%) using OWA. Overall, both methods revealed a similar spatial pattern and identified a substantial proportion of the Razavar Watershed as being exposed to relatively high groundwater contamination potential.

### Conclusion

The results showed that the Razavar Watershed has a high potential for groundwater vulnerability, with more than 40% of its area falling within the high and very high vulnerability classes. The central parts of the watershed, particularly areas adjacent to rivers and major roads and those characterized by lower elevation and slope, exhibited the greatest

sensitivity. This spatial pattern is influenced by geological characteristics, land use, and the density of human activities. Accordingly, strengthening the monitoring of industrial and agricultural activities, managing waste and land-use changes, continuously monitoring water quality, and regularly updating vulnerability maps are among the most important measures for reducing contamination risks and protecting groundwater resources. In addition, restricting development in sensitive

zones and increasing local community awareness can contribute to the sustainable management of groundwater resources. Nevertheless, limitations such as the accuracy of elevation and geological data, the inability of the WLC and OWA models to fully capture the complexity of the hydrogeological characteristics of the karst aquifer, and the exclusion of seasonal and climatic variations should be taken into account when interpreting the results.

## **Ethical Considerations**

### **Funding**

According to the corresponding author, this research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

### **Author Contributions**

The authors have contributed collectively to all stages of the research.

### **Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process**

The authors declare that no artificial intelligence (AI) tools were used in the writing of this manuscript.

### **Conflict of Interest**

The authors declare that there is no conflict of interest.

### **Data Availability Statement**

The data are available upon request from the authors.

### **Acknowledgments**

The authors wish to express their sincere gratitude to all individuals, organizations, and institutions that contributed to the preparation of this article.



## پتانسیل‌سنجی مناطق مستعد آلودگی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رازآور)

مهرنوش قدیمی<sup>\*۱</sup>، فرخنده مرادی<sup>۲</sup>

۱. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: [Ghadimi@ut.ac.ir](mailto:Ghadimi@ut.ac.ir)

۲. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [Farkhondemoradi5@gmail.com](mailto:Farkhondemoradi5@gmail.com)

| اطلاعات مقاله                                                                                                 | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>تاریخچه مقاله:</b><br>دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷<br>بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳<br>پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰<br>انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>واژه‌های کلیدی:</b> مناطق کارستیک، آلودگی‌های زیست محیطی، منابع آب زیرزمینی، حوضه آبریز رازآور.            | مناطق کارستیک به دلیل نفوذپذیری بالایی که دارند، پتانسیل آسیب‌پذیری بیش‌تری در برابر آلودگی منابع آب زیرزمینی دارند. از جمله مناطقی که با این مسئله مواجه است، حوضه آبخیز رازآور در بین استان‌های کردستان و کرمانشاه است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد آلودگی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز رازآور پرداخته شده است. در این تحقیق از لایه رقومی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، ArcGIS، TerrSet و سامانه گوگل ارث انجین بوده است. همچنین در این تحقیق از مدل‌های تحلیل AHP، WLC و OWA به‌منظور شناسایی مناطق مستعد آلودگی منابع آب زیرزمینی استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از مدل WLC، به ترتیب ۱۵/۹ و ۳۰/۵ درصد از حوضه، در کلاس پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی زیاد و زیاد در برابر آلودگی منابع آب زیرزمینی قرار دارند. به علاوه، بر اساس نتایج بدست آمده از مدل OWA، به ترتیب ۱۲/۱ و ۲۷/۳ درصد از حوضه، در کلاس پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی زیاد و زیاد در برابر آلودگی قرار دارند. همچنین نتایج آنالیز مکانی مناطق مستعد آلودگی نیز نشان داده است که در یک روند کلی، مناطق میانی حوضه آبخیز رازآور به دلیل نوع لیتولوژی، نزدیکی به رودخانه و جاده‌های اصلی و همچنین ارتفاع و شیب کم، پتانسیل بالایی از نظر آلودگی منابع آب زیرزمینی دارند. |

**استناد:** قدیمی، مهرنوش و مرادی، فرخنده. (۱۴۰۵). پتانسیل‌سنجی مناطق مستعد آلودگی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رازآور). پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۲ (۱)، ۱-۱۵. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.144377.1034>



## مقدمه

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی در سراسر جهان به شمار می‌آیند (پریرا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). این منابع به‌عنوان بخش مهمی از چرخه هیدرولوژیکی، نقشی حیاتی در پایداری زیست‌محیطی و توسعه اقتصادی کشورها ایفا می‌کنند. در مناطقی که با کمبود منابع آب سطحی روبه‌رو هستند، اتکای جوامع انسانی به منابع آب زیرزمینی بیشتر شده و این مسئله، ضرورت حفاظت از این منابع را دوچندان کرده است. در میان انواع مختلف آبخوان‌ها، سیستم‌های کارستیک جایگاه ویژه‌ای دارند، چرا که حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد سطح خشکی‌های کره زمین را شامل می‌شوند و آب شرب نزدیک به یک‌چهارم جمعیت جهان را تأمین می‌کنند (فورد و ویلیامز<sup>۲</sup>، ۲۰۰۷).

محیط‌های کارستی در نتیجه‌ی انحلال سنگ‌های کربناته نظیر آهک و دولومیت توسط آب‌های اسیدی تشکیل می‌شوند و به دلیل ساختار زمین‌شناختی منحصر به فرد خود، از ویژگی‌هایی چون تخلخل ثانویه بالا، شبکه پیچیده‌ای از کانال‌ها، شکستگی‌ها، درزها و غارها برخوردارند (مادارا و آندرو<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱؛ جیان<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که جریان آب در این محیط‌ها از نظم خطی تبعیت نکند و مسیرهای زیرسطحی پیچیده‌ای را طی کند. در نتیجه، سرعت حرکت آب در سیستم‌های کارستی بالا و زمان ماند آن در زیرزمین کوتاه است (دوان<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۳؛ کاسانو<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). چنین شرایطی موجب می‌شود توان خودپالایی این آبخوان‌ها بسیار پایین باشد و در برابر آلودگی‌های محیطی، به‌ویژه آلاینده‌های شیمیایی و میکروبی، آسیب‌پذیری بالایی داشته باشند (هو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۲۲).

آلاینده‌ها در این مناطق، به‌ویژه از منابع نقطه‌ای مانند فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، و منابع غیرنقطه‌ای همچون رواناب‌های کشاورزی حاوی نیترات، فسفات و آفت‌کش‌ها، به‌سرعت به درون سیستم نفوذ کرده و می‌توانند کیفیت آب زیرزمینی را در مدت کوتاهی کاهش دهند (پاریس<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر این، پیچیدگی ساختار هیدروژئولوژیکی محیط‌های کارستی و وجود مسیرهای متعدد جریان، ردیابی و پیش‌بینی مسیر حرکت آب و آلاینده‌ها را دشوار می‌سازد (پلان<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ پاریس و جوان، ۲۰۰۷). بنابراین، پایش و مدیریت این منابع نیازمند به‌کارگیری رویکردهای نوین مدل‌سازی عددی، روش‌های ردیابی هیدروشیمیایی و تکنیک‌های چندمعیاره ارزیابی آسیب‌پذیری است. در سال‌های اخیر، رشد سریع جمعیت، گسترش شهرنشینی، توسعه کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی، فشارهای فزاینده‌ای را بر منابع آب کارستیک وارد کرده است و این منابع را در معرض خطر آلودگی شدید قرار داده است (کار<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۲۲).

موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا بخش‌هایی از کشور در نواحی کارستیک قرار گیرند (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۶). واحد زمین‌شناسی زاگرس در غرب ایران یکی از مهم‌ترین مناطق کارستیک کشور به‌شمار می‌آید (گنجائیان و همکاران، ۱۴۰۴) که به‌دلیل وجود سازندهای کربناته گسترده، شرایط اقلیمی مناسب و بارش‌های نسبتاً زیاد، از منابع آبی قابل توجهی برخوردار است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷). از جمله نواحی مهم کارستیک در زاگرس، حوزه آبخیز رازآور است که در حد فاصل شهرهای کامیاران و کرمانشاه واقع شده است. این منطقه با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی خود، تراکم بالای سکونتگاه‌ها، و گسترش فعالیت‌های انسانی، پتانسیل بالایی در مواجهه با خطر آلودگی دارد (مختاری و همکاران، ۱۴۰۲).

حوزه آبخیز رازآور، واقع در حد فاصل شهرهای کامیاران و کرمانشاه، نمونه‌ای بارز از چنین شرایطی است. در این حوزه، سازندهای کارستیک، تراکم بالای سکونتگاه‌ها، فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، و نبود سامانه‌های مؤثر جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، موجب افزایش احتمال ورود آلاینده‌ها به آبخوان شده است. در عین حال، به‌دلیل ویژگی‌های ساختاری زمین، جریان آب زیرزمینی در این منطقه بسیار پیچیده است و مسیر حرکت آلاینده‌ها به‌راحتی قابل ردیابی نیست. این امر نه تنها کیفیت منابع آب شرب و کشاورزی را تهدید می‌کند، بلکه می‌تواند موجب بروز مشکلات بهداشتی، زیست‌محیطی و اقتصادی در سطح منطقه شود.

از سوی دیگر، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون پژوهش‌های محدودی در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری و پتانسیل آلودگی منابع آب زیرزمینی در حوزه رازآور انجام شده است و اغلب مطالعات موجود، تنها به بررسی کلی کیفیت آب یا تحلیل‌های مقطعی بسنده کرده‌اند. در نتیجه، فقدان نقشه‌ها و مدل‌های جامع آسیب‌پذیری، مدیریت کارآمد منابع آب در این حوزه را با مشکل مواجه کرده است.

1. Pereira
2. Ford & Williams
3. Mudarra & Andreo
4. Jian
5. Duan
6. Cusano
7. Hou
8. Parise
9. Plan
10. Kaur

بنابراین، ضرورت انجام پژوهشی جامع برای پتانسیل‌سنجی و شناسایی مناطق مستعد آلودگی منابع آب زیرزمینی در حوزه آبخیز رازآور کاملاً محسوس است. این پژوهش می‌کوشد با بهره‌گیری از داده‌های هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی، مناطق با بیشترین احتمال آلودگی را شناسایی کرده و با ارائه نقشه آسیب‌پذیری، زمینه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی، پایش و مدیریت پایدار منابع آب در منطقه فراهم سازد.

## مرور ادبیات و سوابق پژوهش

در طی سال‌های اخیر، روند افزایشی جمعیت، زمینه را برای بروز مخاطرات طبیعی و انسانی زیادی فراهم آورده است (جمینی و همکاران، ۱۴۰۲، صادقی و جوان، ۱۴۰۴). از جمله مهم‌ترین مخاطرات، آلودگی منابع کارستیک است. کارست هرگونه توپوگرافی ناشی از انحلال سنگ‌ها است (نجم‌الدینی، ۱۴۰۴). آبخوان‌های کارستیک به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناختی و هیدروژئولوژیکی خاص خود، از جمله حضور شبکه‌های پیچیده از کانال‌ها، شکستگی‌ها و غارها، نفوذ سریع آب و اتصال مستقیم سطح به زیرزمین، پتانسیل بالایی برای آلودگی دارند (لیو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۲). این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که آلاینده‌ها بتوانند در مدت زمان کوتاهی وارد منابع آب زیرزمینی شوند و توان خودپالایی طبیعی آبخوان‌ها اغلب ناکافی باشد. بنابراین، حفاظت از کیفیت آب در این سیستم‌ها نیازمند شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و تعیین نواحی با بیش‌ترین ریسک آلودگی است (پتروویچ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۵).

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک آبخوان‌های کارستیک توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به DRASIC، SINTACS، COP، EPIK و مدل‌های فازی اشاره کرد. این روش‌ها با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و کاربری اراضی، نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری را ارائه می‌کنند (ین<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). تفاوت اصلی این روش‌ها در تعداد و نوع پارامترها، وزن‌دهی و نحوه امتیازدهی آن‌هاست و انتخاب روش مناسب می‌تواند دقت و قابلیت اجرایی ارزیابی را بهبود بخشد. علاوه بر این، تغییرات کاربری اراضی و گسترش مناطق سکونتگاهی و صنعتی، فشار بیش‌تری بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کنند و روند توسعه نواحی انسان‌ساخت باید در ارزیابی آسیب‌پذیری لحاظ شود. شناسایی همزمان آسیب‌پذیری ذاتی، تراکم منابع آلاینده و محدوده گیرش چاه‌ها می‌تواند یک شاخص یکپارچه ریسک آب زیرزمینی ایجاد کند که کارکردی کاربردی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی حفاظتی دارد (وگلباچر<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به اهمیت آبخوان‌های کارستیک در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت، شناخت دقیق مناطق آسیب‌پذیر، توسعه مدل‌های ارزیابی مناسب و تحلیل تغییرات کاربری اراضی، مبنای علمی و عملی برای مدیریت پایدار و محافظت از منابع آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. این رویکرد نه تنها می‌تواند از آلودگی منابع جلوگیری کند بلکه تضمینی برای تأمین آب پایدار برای نسل‌های آینده خواهد بود (بیوندیک<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۱).

در ارتباط با موضوع مورد مطالعه، تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به راوبار و گولدسچیدر<sup>۶</sup> (۲۰۰۷) اشاره کرد که بر مبنای پارامترهای مختلف محیطی به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی در اسلوونی پرداختند و نشان دادند که مناطق جنوب غربی منطقه، در معرض آلودگی قرار دارند. مارین<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و منابع آب شرب در یک آبخوان کارستی کم‌عمق در جنوب غربی اسلوونی پرداختند. در این تحقیق از دو روش COP+K و رویکرد اسلوونیایی استفاده شده است. هر دو روش از داده‌های گسترده زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و شرایط نفوذ آب استفاده می‌کنند، اما در نحوه امتیازدهی، وزن‌دهی و طبقه‌بندی پارامترها تفاوت دارند. نتایج نشان داد نقشه‌های حاصل از دو روش تفاوت قابل توجهی دارند؛ به‌طوری‌که در روش COP+K، شرایط نفوذ و فاصله از منبع آب بیشترین تأثیر را بر آسیب‌پذیری دارند، در حالی که در روش اسلوونیایی ضخامت خاک، ویژگی‌های مورفولوژیکی و تغییرات هیدروژئولوژیکی زمانی نقش تعیین‌کننده‌تری دارند. قدیمی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از روش‌های COP و EPIK، وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستیک را در غرب ایران ارزیابی کردند. نتایج مدل COP نشان داد که به‌ترتیب ۳۷/۸۹، ۲۶/۸۴، ۱۳/۹۵ و ۲۱/۳۲ درصد از منطقه دارای آسیب‌پذیری بسیار کم، کم، متوسط و زیاد است، در حالی که مدل EPIK به‌ترتیب ۲۳/۳۸، ۱۴/۵۶، ۳۵/۳۱ و ۲۶/۷۵ درصد را در همان طبقات نشان داد. مناطق دارای آسیب‌پذیری پایین عمده‌تاً در نواحی بدون کارست و دشت‌های پیرامون کوه‌ها قرار دارند و بیش‌ترین

1. Liu
2. Petrovic
3. Yin
4. Vogelbacher
5. Biondic
6. Ravbar & Goldscheider
7. Marin
8. Ghadimi

آسیب‌پذیری در هر دو مدل در نواحی آهکی بیستون با پوشش گیاهی کم، بارندگی زیاد و فقدان لایه خاک مشاهده شد. بر اساس نتایج، حوضه‌های تغذیه چشمه‌های مراب، میر احمد و بی‌ابر بیش‌ترین میزان آسیب‌پذیری را دارند. گومز<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی نقش عوامل انسانی در آسیب‌پذیری منابع آب کارستیک پرداختند. در این تحقیق با مرور راهنماها و کاربردهای دوازده روش ارزیابی آسیب‌پذیری در ۴۵ منطقه مختلف جهان، به مقایسه تفاوت‌های آن‌ها در پارامترها، ضرایب و وزن‌دهی پرداخته شده است و در نهایت، ملاحظات جدیدی برای ارزیابی دقیق‌تر پارامترها و تعیین نرخ و وزن آن‌ها بر اساس سناریوهای نفوذ آب پیشنهاد شده است تا فرآیند تحلیل آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی در سامانه‌های کارستی بهبود یابد. احمدی‌فر و همکاران (۱۳۹۶) به پهنه‌بندی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی در دشت سراب پرداختند. در این تحقیق از دو مدل DRASTIC و SINTACS برای ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده شده است. نتایج نشان داد در مدل DRASTIC بیش‌تر نواحی منطقه دارای آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد و در مدل SINTACS نیز حدود ۷۷ درصد از منطقه دارای پتانسیل متوسط تا زیاد است. تحلیل نقشه‌های ریسک‌پذیری نشان داد مدل‌های DRASTICLU و AHP-DRASTICLU مناطق با خطر آلودگی متوسط تا زیاد را با دقت بیش‌تری مشخص کرده‌اند. سعادتی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل MODFLOW و MODPATH، ارزیابی آسیب‌پذیری و پهنه‌بندی ریسک آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است بخش اعظم دشت اردبیل در محدوده حداقل آسیب‌پذیری قرار داشته است، در حالی که بیش‌ترین مقادیر شاخص در مناطق پرجمعیت، حاشیه جاده‌ها و نواحی صنعتی مشاهده شده است. به‌طور کلی، دشت اردبیل طبق این شاخص در محدوده آسیب‌پذیری پایین قرار دارد و روش ارائه‌شده یک راهکار دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای حفاظت از منابع آب آشامیدنی و کشاورزی و تأمین آب زیرزمینی پایدار برای نسل‌های آینده فراهم می‌کند. بیاتی خطیب و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از روش DRASTI و الگوریتم‌های فازی، به بررسی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در دشت تبریز پرداختند. نتایج مدل DRASTIC نشان داده است که شاخص آسیب‌پذیری بین ۵۷ تا ۱۶۵ است که از طبقه بدون خطر تا خطر آلودگی زیاد متغیر می‌باشد، در حالی که نتایج مدل فازی نشان داد ۴۷ درصد مساحت دشت دارای آسیب‌پذیری زیاد است. همچنین نقشه‌ها نشان دادند که مناطق شمال غربی تا جنوب غربی، شامل شهر تبریز، بیش‌ترین پتانسیل آلودگی و بخش‌های جنوب غربی کم‌ترین پتانسیل را دارند. مختاری و همکاران (۱۴۰۲) به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی در شهرستان روانسر با استفاده از روش‌های COP و EPIK پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که حوضه روانسر دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی است، به‌طوری‌که در روش COP حدود ۲۷/۸ درصد از منطقه دارای آسیب‌پذیری خیلی زیاد و در روش EPIK حدود ۲۹/۵ درصد از منطقه دارای آسیب‌پذیری زیاد است. از نظر توزیع مکانی، نتایج هر دو روش نشان داد مناطق شمالی حوضه بیش‌ترین و مناطق جنوبی کم‌ترین آسیب‌پذیری را دارند. پیره و همکاران (۱۴۰۳) به شناسایی مناطق کارستیک آسیب‌پذیر در برابر آلودگی در حوزه آبریز تکاب پرداختند. نتایج مدل COP نشان داد حدود ۳۳ درصد از منطقه، به‌ویژه مناطق شمال غربی و جنوبی حوضه، به دلیل نوع لیتولوژی، پوشش زمین، شرایط هیدرواقليمی و ژئومورفولوژی، دارای آسیب‌پذیری زیاد تا خیلی زیاد هستند. همچنین، ارزیابی تغییرات کاربری اراضی نشان داد که نواحی انسان‌ساخت از حدود ۸ کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۰ به ۱۹ کیلومتر مربع در سال ۲۰۱۹ افزایش یافته‌اند، که بیانگر افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری در بخش‌های جنوبی و شمال غربی حوضه در برابر آلودگی است.

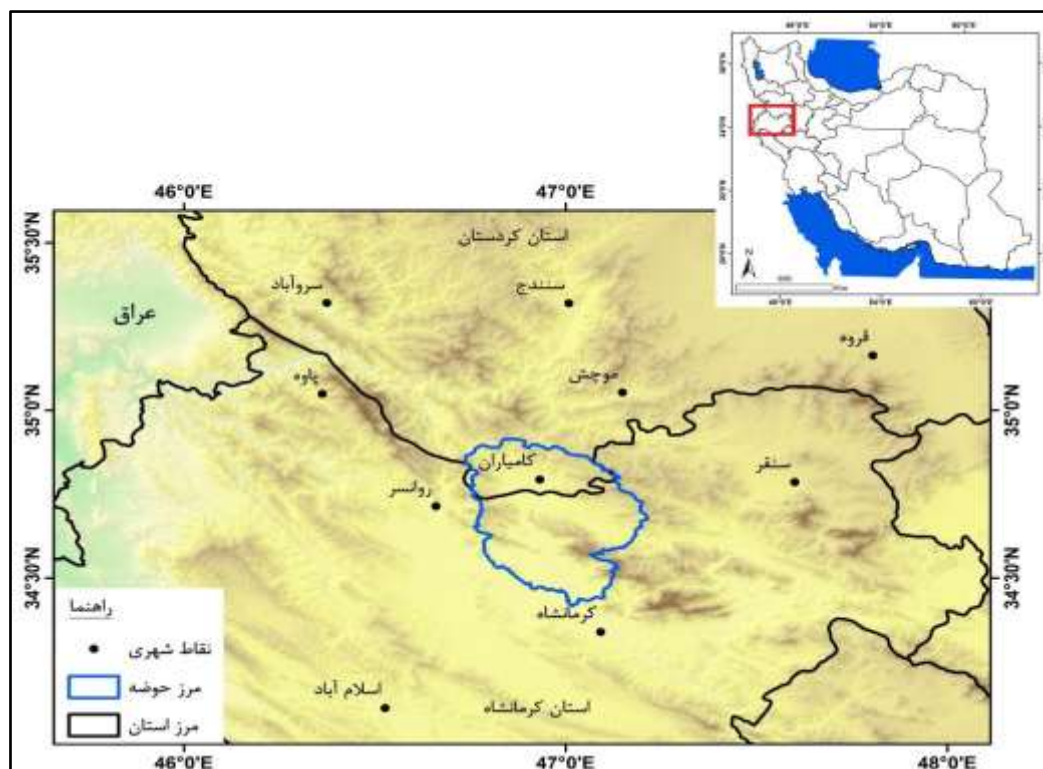
مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستیک با استفاده از مدل‌های مختلف و روش‌های تحلیل چندمعیاره صورت گرفته است. با این حال، اغلب تحقیقات به ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی بسنده کرده و کم‌تر به ترکیب هم‌زمان شاخص‌های ذاتی، عوامل انسانی و فشارهای ناشی از توسعه کاربری اراضی پرداخته‌اند. همچنین، بسیاری از پژوهش‌ها فاقد یک مدل‌سازی تلفیقی مکانی هستند که در آن از تصاویر سنجش‌ازدور، مدل ارتفاعی دقیق و تحلیل وزن‌دهی هوشمند در محیط‌های GIS برای تولید یک شاخص یکپارچه ریسک استفاده شود. در مورد منطقه مورد مطالعه (حوضه آبخیز رازآور) نیز هیچ پژوهش جامعی که هم‌زمان آسیب‌پذیری ذاتی، شدت منابع آلاینده، تغییرات کاربری اراضی و ابزارهای ترکیبی تصمیم‌گیری را برای تعیین پهنه‌های پرخطر آلودگی آب زیرزمینی تحلیل کند، انجام نشده است. این موضوع خلأ آشکاری در حوزه مدیریت ریسک آلودگی در این آبخوان حساس ایجاد کرده است. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری یک رویکرد تلفیقی و جامع برای ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک آلودگی آب زیرزمینی در آبخوان کارستیک حوضه رازآور است. در این تحقیق، از داده‌های متنوعی شامل لایه‌های رقومی زمین‌شناسی، مدل ارتفاعی SRTM و تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت یکپارچه در محیط‌های ArcGIS، Google Earth Engine و TerrSet پردازش شده و سپس با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP، WLC و OWA وزن‌دهی و ترکیب شده‌اند. این رویکرد امکان ارزیابی هم‌زمان ویژگی‌های طبیعی آبخوان، عوامل انسانی، تغییرات کاربری اراضی و توزیع منابع آلاینده را فراهم کرده و نقشه‌ای دقیق‌تر و کاربردی‌تر از پهنه‌های پرخطر ارائه می‌دهد. ادغام هم‌زمان

داده‌های سنجش‌ازدور، مدل‌سازی مکانی و روش‌های چندمعیاره، چارچوبی نوین برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در منطقه ایجاد می‌کند.

## روش‌شناسی پژوهش

### محدوده مورد مطالعه

حوضه آبخیز رازآور با مساحت ۱۵۳۷ کیلومترمربع، از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده دو استان کردستان و کرمانشاه قرار دارد (شکل ۱). رودخانه اصلی این حوضه رازآور نام دارد که از ارتفاعات شاهو در جنوب شهرستان کامیاران سرچشمه می‌گیرد و سپس با حرکت به سمت جنوب وارد شهرستان کرمانشاه می‌شود. این رودخانه در نزدیکی روستای حسین‌آباد به رودخانه مرگ ملحق می‌شود و در نهایت وارد حوضه قره‌سو می‌شود. از نظر تقسیمات مورفوتکتونیکی، این حوضه در زون زاگرس مرتفع قرار گرفته و از نظر ساختاری نیز از خصوصیات این زون پیروی می‌کند. از نظر لیتولوژی، با توجه به اینکه بخش زیادی از وسعت این حوضه را توده‌های آهکی دربرگرفته است، بنابراین جزء مناطق کارستیک محسوب می‌شود. از نظر ژئومورفولوژی، مناطق میانی این حوضه را واحد دشت دربرگرفته است که از اطراف به دیواره‌های کوهستانی شاهو و بیستون منتهی می‌شود. از نظر آب و هوایی نیز با توجه به قرارگیری در مسیر بادهای غربی داری حدود ۵۰۰ میلی‌متر بارش است.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

## روش تحقیق

در این تحقیق از لایه رقومی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ به عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر)، TerrSet (به‌منظور اجرای مدل‌های مورد نظر) و سامانه گوگل ارث انجین<sup>۱</sup> (به‌منظور تهیه نقشه کاربری اراضی) بوده است. در این تحقیق همچنین از مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، WLC<sup>۲</sup> و OWA<sup>۳</sup> استفاده شده است. در ادامه به تشریح مراحل تحقیق پرداخته شده است:

1. Google Earth Engine
2. Weighted Linear Combination
3. Ordered Weighted Averaging

**مرحله اول (انتخاب پارامترهای و استانداردهای آن‌ها):** در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی از ۸ پارامتر لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، فاصله از نواحی سکونتگاهی، فاصله از جاده اصلی، فاصله از رودخانه و کاربری اراضی استفاده شده است. انتخاب پارامترها بر مبنای وضعیت منطقه و تحقیقات پیشین (بیاتی‌خطیبی و همکاران، ۱۴۰۰؛ حجازی و حیدری، ۱۴۰۲؛ مختاری و همکاران، ۱۴۰۲) بوده است. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر پارامتر، لایه‌های اطلاعاتی استانداردسازی شده است. به منظور استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی، به هر لایه وزن درون لایه‌ای بین صفر تا یک داده شده است به‌طوری‌که به مناطق آسیب‌پذیر ارزش نزدیک یک و به مناطقی که پتانسیل آسیب‌پذیری کم‌تری دارند ارزش نزدیک صفر داده شده است (جدول ۱).

جدول ۱. نحوه استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی

| ردیف | پارامتر                  | نحوه استانداردسازی                                                                                                                                                                                                                                |
|------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱    | لیتولوژی                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- طبقه آهک دارای وزن ۰/۹</li> <li>- طبقه آهک و شیل دارای وزن ۰/۷</li> <li>- طبقه مواد آبرفتی دارای وزن ۰/۶</li> <li>- طبقه مارن دارای وزن ۰/۵</li> <li>- طبقه کنگلومرا و ماسه‌سنگ دارای وزن ۰/۴</li> </ul> |
| ۲    | فاصله از گسل             | مناطق نزدیک خط گسل، دارای ارزش نزدیک ۱ و مناطق دور از خط گسل، دارای ارزش نزدیک صفر هستند.                                                                                                                                                         |
| ۳    | ارتفاع                   | مناطق کم ارتفاع، دارای ارزش نزدیک ۱ و مناطق مرتفع، دارای ارزش نزدیک صفر هستند.                                                                                                                                                                    |
| ۴    | شیب                      | مناطق کم شیب، دارای ارزش نزدیک ۱ و مناطق با شیب زیاد، دارای ارزش نزدیک صفر هستند.                                                                                                                                                                 |
| ۵    | فاصله از نواحی سکونتگاهی | مناطق نزدیک نواحی سکونتگاهی، دارای ارزش نزدیک ۱ و مناطق دور از نواحی سکونتگاهی، دارای ارزش نزدیک صفر هستند.                                                                                                                                       |
| ۶    | فاصله از جاده اصلی       | مناطق نزدیک جاده اصلی، دارای ارزش نزدیک ۱ و مناطق دور از جاده اصلی، دارای ارزش نزدیک صفر هستند.                                                                                                                                                   |
| ۷    | فاصله از رودخانه         | مناطق نزدیک رودخانه، دارای ارزش نزدیک ۱ و مناطق دور از رودخانه، دارای ارزش نزدیک صفر هستند.                                                                                                                                                       |
| ۸    | کاربری اراضی             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- کاربری انسان‌ساخت دارای وزن ۰/۹</li> <li>- کاربری نواحی بدون پوشش دارای وزن ۰/۷</li> <li>- کاربری اراضی کشاورزی دارای وزن ۰/۵</li> <li>- کاربری مراتع دارای وزن ۰/۳</li> </ul>                           |

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

**مرحله دوم (وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی):** در این مرحله بر مبنای نظرات کارشناسان و با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice و مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی، وزن هر لایه بر روی آن اعمال شده است.

**مرحله سوم (اجرای مدل‌های WLC و OWA):** پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن هر لایه بر روی آن، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار TerrSet شده است و سپس لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از دو روش WLC و OWA با هم ترکیب شده است و به این صورت نقشه مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی با استفاده از این دو روش تهیه شده است. در حوزه تصمیم‌گیری چند معیاره (Multi-Criteria Decision Making - MCDM)، دو روش مهم و پرکاربرد برای تلفیق یا تجمیع داده‌های فضایی یا معیارهای تصمیم‌گیری، روش‌های WLC<sup>۱</sup> و OWA<sup>۲</sup> هستند که در این تحقیق به منظور دستیابی به اطمینان بیشتر و مقایسه نتایج، از هر دو روش استفاده شده است. WLC یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در تحلیل‌های تصمیم‌گیری مکانی است که در آن به هر معیار یک وزن تخصیص داده می‌شود و سپس مقادیر هر گزینه با توجه به این وزن‌ها با هم ترکیب می‌شوند (رابطه ۱). روش OWA که توسط Ronald Yager در سال ۱۹۸۸ معرفی شد، یک روش تجمیع انعطاف‌پذیرتر از WLC است که امکان کنترل درجه خوش‌بینی یا بدبینی تصمیم‌گیرنده را فراهم می‌کند (رابطه ۲) (استمن<sup>۳</sup>، ۲۰۰۳).

$$S = \sum (w_i \times x_i)$$

رابطه ۱: معادله روش WLC

۱. Weighted Linear Combination  
۲. Ordered Weighted Averaging  
۳. Eastman

در این رابطه،  $S$ : امتیاز نهایی گزینه،  $w_i$ : وزن معیار  $\lambda_m$  و  $x_i$ : مقدار نرمال شده معیار  $\lambda_m$  است.

$$OWA(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum (w_i \times x_{(i)})$$

رابطه ۲: معادل روش OWA

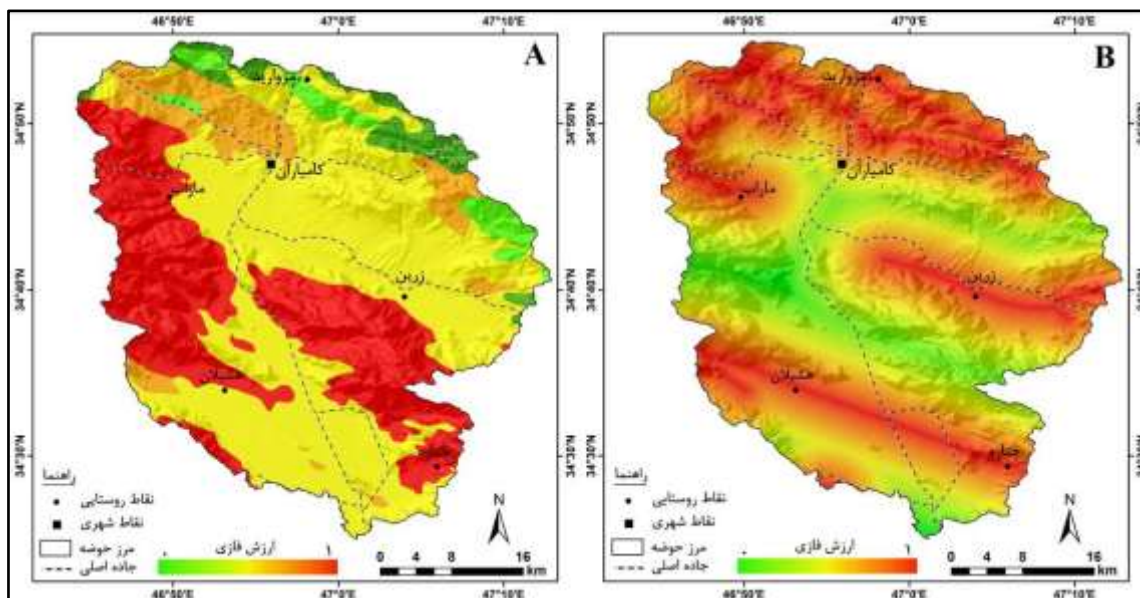
در این رابطه،  $\{x_{(i)}\}$ : مقدار  $\lambda_m$  مرتب شده معیارها (نزولی یا صعودی) و  $w_i$ : وزن مرتبط با رتبه  $\lambda_m$  است.

## یافته‌ها و بحث

### تشریح پارامترهای مورد استفاده

با توجه به اینکه توجه به پارامترهای طبیعی و انسانی در برنامه‌ریزی‌های مختلف، خصوصاً شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر آلودگی منابع آب کارستیک بسیار حائز اهمیت است، در این پژوهش بر مبنای ۸ پارامتر محیطی، به شناسایی مناطق در معرض آلودگی منابع آب زیرزمینی پرداخته شده است. در ادامه به تشریح پارامترهای مورد استفاده پرداخته شده است.

**لیتولوژی و گسل:** پارامترهای زمین‌شناسی نقش مهمی در تعیین وضعیت آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی دارند. با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش از دو پارامتر لیتولوژی و فاصله از خطوط گسل به‌عنوان پارامترهای موثر استفاده شده است. نوع لیتولوژی تعیین‌کننده میزان نفوذپذیری و همچنین وضعیت درد و شکاف‌های هر منطقه است، بنابراین نقش مهمی در تعیین میزان آسیب‌پذیری در برابر آلودگی منابع آب زیرزمینی دارد. به‌طورمعمول مناطقی که دارای لیتولوژی نفوذپذیر مانند سنگ‌های آهکی هستند دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بیش‌تری در برابر آلودگی هستند. همچنین مناطق دارای لیتولوژی نفوذناپذیر پتانسیل آسیب‌پذیری کم‌تری دارند. با توجه به اینکه بخش زیادی از وسعت حوضه آبخیز رازآور را توده‌های آهکی دربرگرفته است و این حوضه جزء مناطق کارستیک محسوب می‌شود، بنابراین از نظر پارامتر لیتولوژی، حوضه مورد مطالعه دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر آلودگی است. به علاوه، فاصله از خط گسل نیز به‌عنوان یکی دیگر از پارامترهای تعیین‌کننده در وضعیت نفوذپذیری و آلودگی منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود. مناطق نزدیک خطوط گسلی به دلیل اینکه دارای درز و شکاف زیادی هستند، توان نفوذپذیری بالایی دارند، بنابراین مستعد آلودگی هستند. با توجه به موارد ذکر شده، پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی و فاصله از خطوط گسل، به مناطق دارای لیتولوژی آهکی و نزدیک خطوط گسلی، ارزش نزدیک ۱ داده شده است (شکل ۲).

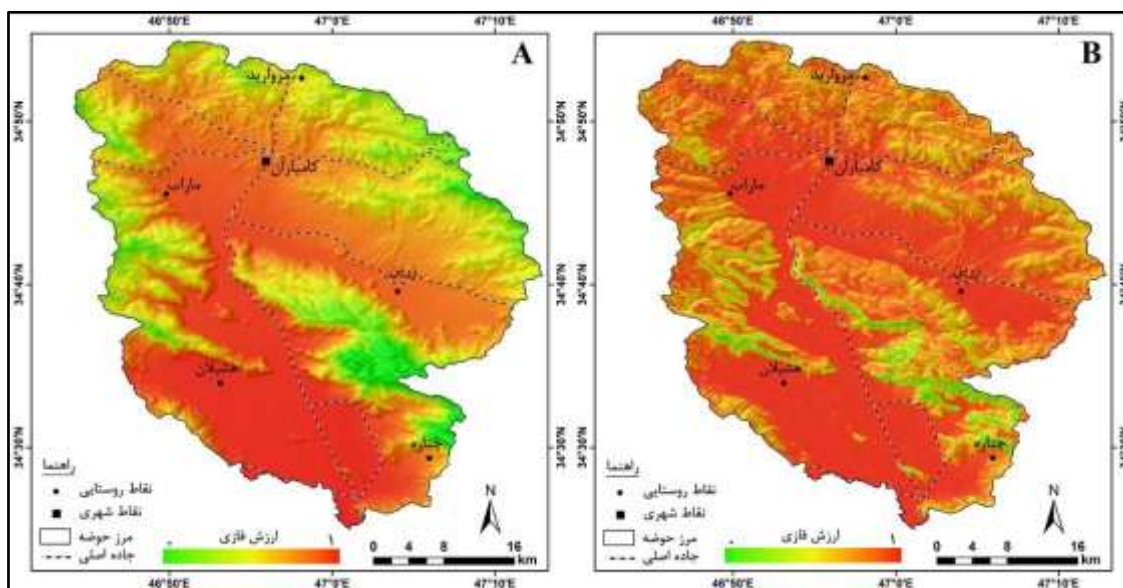


شکل ۲. نقشه استانداردسازی شده (A) لیتولوژی (B) فاصله از خطوط گسل

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

**ارتفاع و شیب:** وضعیت ژئومورفولوژی هر منطقه نقش مهمی در تعیین میزان آسیب‌پذیری در برابر آلودگی دارد. در واقع میزان ارتفاع و شیب هر منطقه تعیین‌کننده نوع کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی است. به‌طورمعمول مناطق مرتفع و با شیب زیاد به دلیل اینکه کم‌تر تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی هستند، پتانسیل آسیب‌پذیری کم‌تری نسبت به مناطق کم ارتفاع و کم شیب دارند. با توجه به موارد ذکر شده،

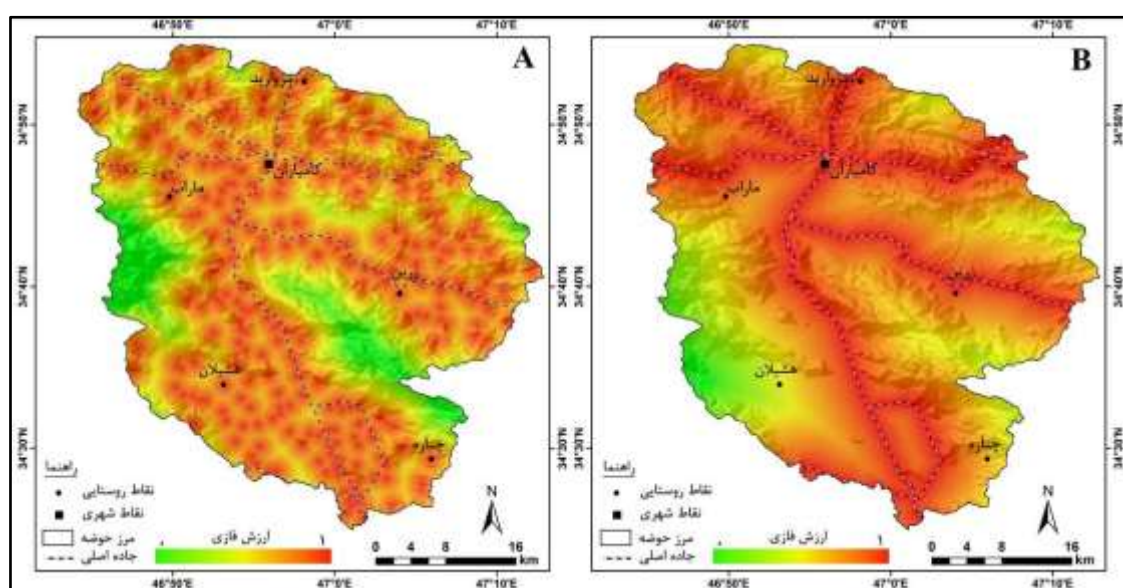
پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر، به مناطق کم ارتفاع و کم شیب به دلیل پتانسیل آسیب‌پذیری بیش‌تر، ارزش نزدیک ۱ داده شده است (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه استانداردسازی شده (A) ارتفاع (B) شیب

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

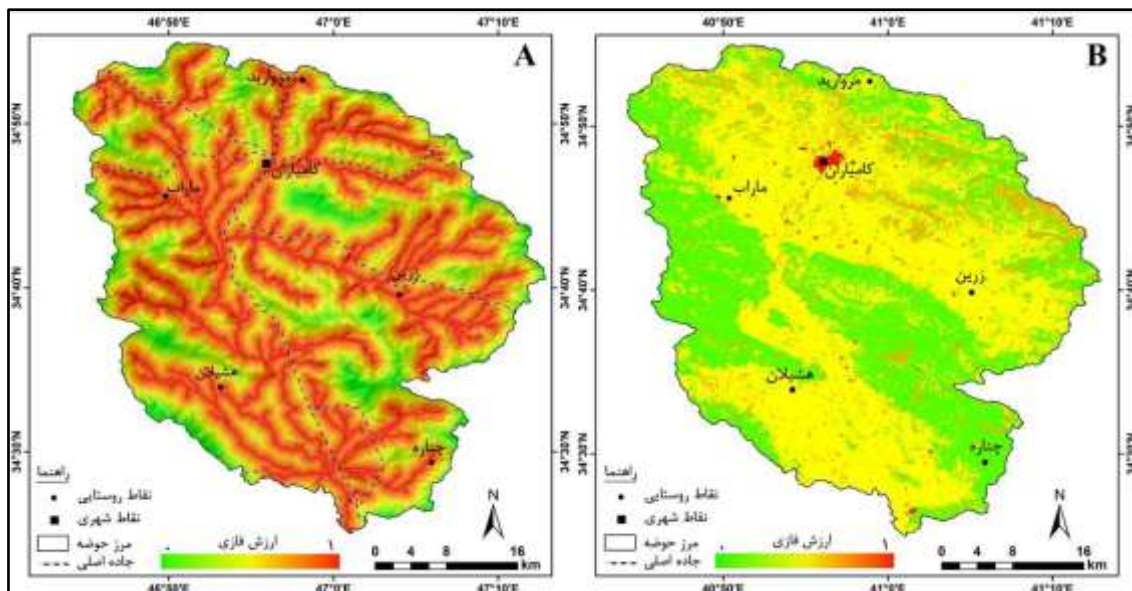
–**فاصله از نواحی سکونتگاهی و جاده اصلی:** مهم‌ترین عامل آلودگی منابع آب زیرزمینی، فعالیت‌های انسانی هستند. به‌طورمعمول، مناطق نزدیک به نواحی سکونتگاهی در معرض تخریب و آلودگی هستند. بررسی وضعیت پراکنش مکانی نواحی سکونتگاهی در حوضه آبخیز رازآور بیانگر این است که بیش‌ترین میزان تراکم مربوط به مناطق میانی حوضه است، بنابراین این مناطق از نظر این پارامتر مستعد تخریب و آلودگی هستند. همچنین مناطق نزدیک به جاده‌های اصلی نیز به دلیل پتانسیل بالایی که جهت فعالیت‌های مختلف انسانی دارد، مستعد آلودگی هستند. با توجه به موارد ذکر شده، پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر به مناطق نزدیک نواحی سکونتگاهی و جاده‌های اصلی ارزش نزدیک یک داده شده است (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه استانداردسازی شده (A) فاصله از نقاط روستایی (B) فاصله از جاده اصلی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

**فاصله از رودخانه و کاربری اراضی:** مناطق نزدیک به رودخانه‌ها به دلیل سطح بالایی آب زیرزمینی و توانایی انتقال بالا، مستعد تخریب و آلودگی هستند. همچنین نوع کاربری اراضی تعیین‌کننده وضعیت فعالیت‌های انسانی و همچنین میزان ریسک آلودگی و تخریب است. مناطقی که دارای کاربری سکونتگاهی، صنعتی و غیره هستند، پتانسیل آلودگی بالایی دارند. همچنین رودخانه‌ها نیز از جمله عوامل موثر در تشدید و انتقال آلودگی محسوب می‌شوند. با توجه به موارد ذکر شده، پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر، به مناطق نزدیک رودخانه‌ها و کاربری نواحی سکونتگاهی ارزش نزدیک یک داده شده است (شکل ۵).

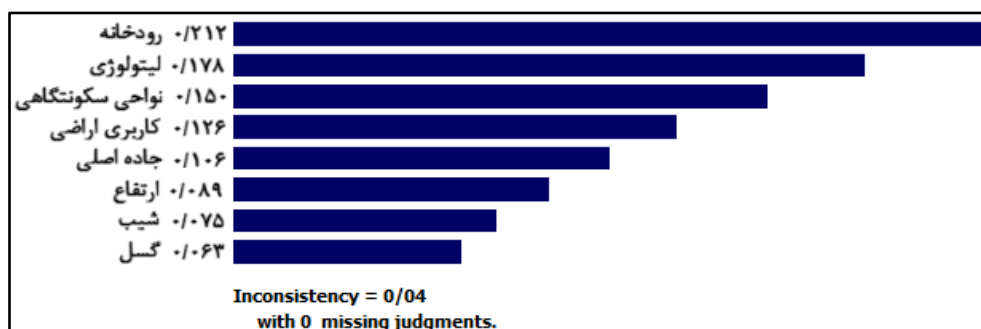


شکل ۵. نقشه استانداردسازی شده (A) فاصله از رودخانه (B) کاربری اراضی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

### وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی

با توجه به اینکه ارزش و اهمیت لایه‌های اطلاعاتی یکسان نیست، در این بخش بر مبنای نظرات کارشناسان و مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده است. بر اساس نتایج بدست آمده، پارامترهای فاصله از رودخانه و لیتولوژی به ترتیب با ۰/۲۱۲ و ۰/۱۷۸، دارای بالاترین ارزش و اهمیت هستند.



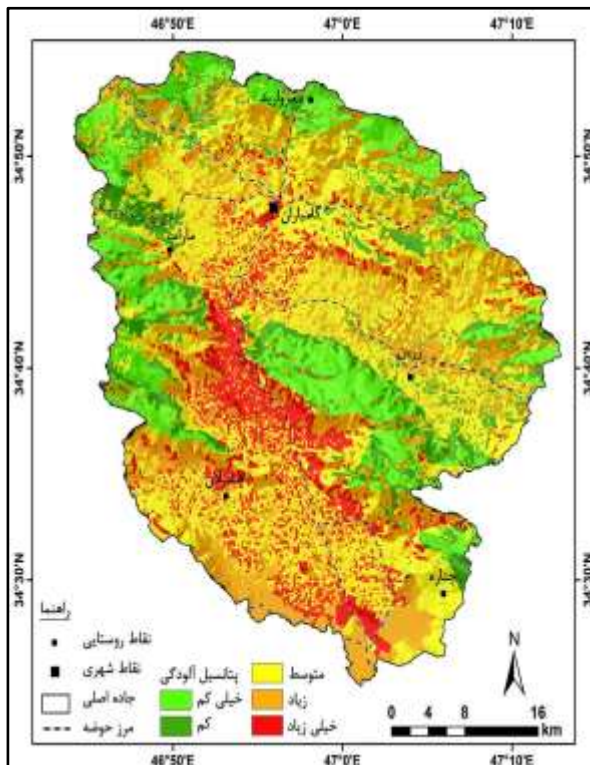
شکل ۶. وزن نهایی لایه‌های اطلاعاتی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

### اجرای مدل‌های WLC و OWA

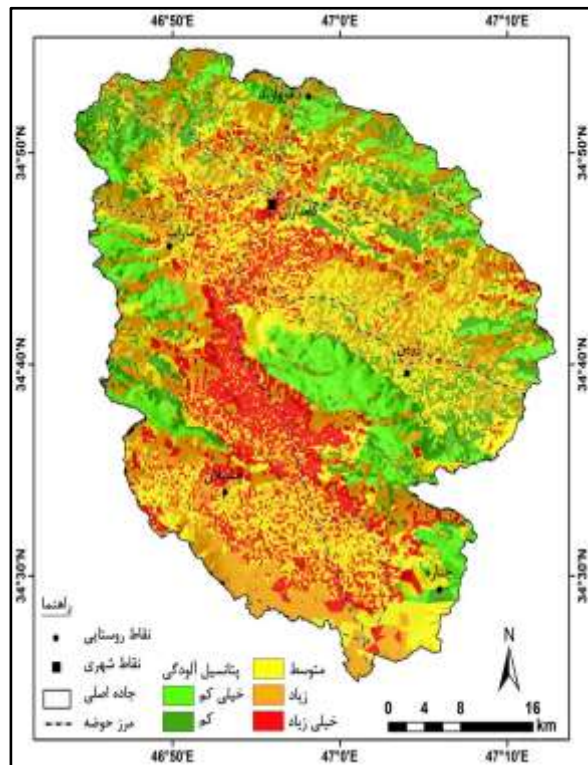
پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن بدست آمده بر روی آن‌ها، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار TerrSet شده است و سپس با استفاده از روش‌های WLC و OWA، نقشه مناطق مستعد آلودگی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز رازآور تهیه شده است (شکل‌های

۷ و ۸). نتایج بدست آمده از هر دو روش نشان داده است که در یک روند کلی، مناطق میانی حوضه آبخیز رازآورد به دلیل نوع لیتولوژی، نزدیکی به رودخانه و جاده‌های اصلی و همچنین ارتفاع و شیب کم، پتانسیل بالایی از نظر آلودگی منابع آب زیرزمینی دارند.



شکل ۸. نقشه پتانسیل آلودگی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش OWA

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۷. نقشه پتانسیل آلودگی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش WLC

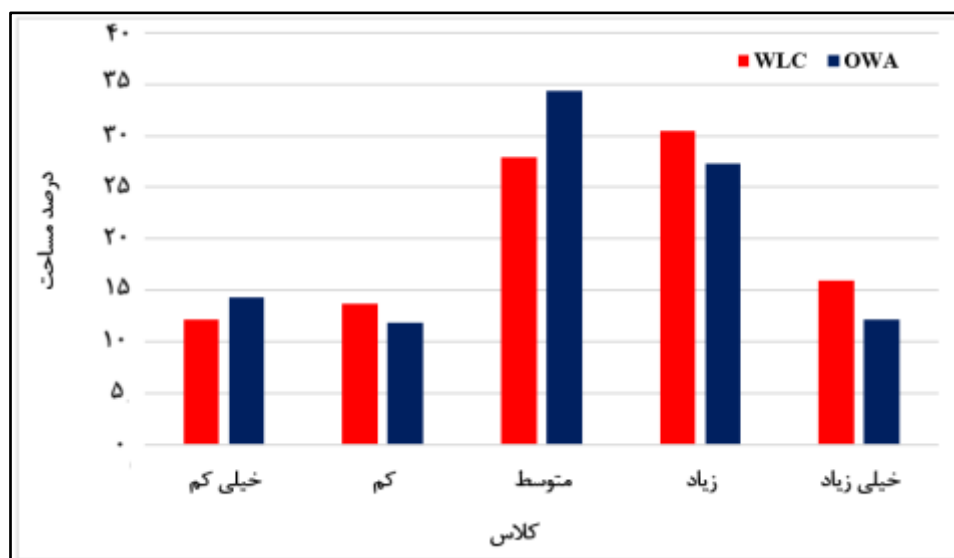
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتایج بررسی و مقایسه وضعیت مساحت و درصد مساحت طبقات مربوط به پتانسیل آلودگی بر مبنای روش‌های WLC و OWA بیانگر این است که در روش WLC، مجموع وسعت طبقات دارای پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد، ۷۱۲ کیلومترمربع (معادل ۴۶/۳ درصد از وسعت حوضه) بوده است و این میزان برای روش OWA، ۶۰۶ کیلومترمربع (۳۹/۴) بوده است. همچنین در روش WLC، مجموع وسعت طبقات دارای پتانسیل آسیب‌پذیری کم و خیلی کم، ۳۹۶ کیلومترمربع (معادل ۲۵/۸ درصد از وسعت حوضه) بوده است و این میزان برای روش OWA، ۴۰۲ کیلومترمربع (۲۶/۲) بوده است (جدول ۲ و شکل ۹).

جدول ۲. مساحت و درصد مساحت طبقات پتانسیل آلودگی

| طبقات     | OWA        |                     | WLC        |                     |
|-----------|------------|---------------------|------------|---------------------|
|           | درصد مساحت | مساحت (کیلومترمربع) | درصد مساحت | مساحت (کیلومترمربع) |
| خیلی کم   | ۱۴/۳       | ۲۲۰                 | ۱۲/۱       | ۱۸۶                 |
| کم        | ۱۱/۸       | ۱۸۲                 | ۱۳/۷       | ۲۱۰                 |
| متوسط     | ۳۴/۴       | ۵۲۹                 | ۲۷/۹       | ۴۲۹                 |
| زیاد      | ۲۷/۳       | ۴۲۰                 | ۳۰/۵       | ۴۶۸                 |
| خیلی زیاد | ۱۲/۱       | ۱۸۶                 | ۱۵/۹       | ۲۴۴                 |

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۹. نمودار درصد مساحت طبقات

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

### نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل نتایج حاصل از مدل‌های WLC و OWA، حوضه آبخیز رازآور دارای پتانسیل بالای آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی است، به‌طوری که بیش از ۴۰ درصد از وسعت حوضه در طبقات آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. تحلیل مکانی نشان می‌دهد مناطق میانی حوضه، به ویژه بخش‌های نزدیک به رودخانه‌ها و جاده‌های اصلی و با ارتفاع و شیب کم، بیش‌ترین حساسیت را دارند. این الگوی توزیع آسیب‌پذیری با ویژگی‌های زمین‌شناختی، پوشش زمین و تراکم سکونتگاه‌ها مرتبط است. مقایسه با دیگر حوضه‌های کارستیک کشور مانند روانسر و تکاب نشان می‌دهد که این روند جغرافیایی مشابه است و تأثیر مستقیم ویژگی‌های محیطی و انسانی بر پتانسیل آلودگی را تأیید می‌کند. بنابراین، حوضه آبخیز رازآور نیازمند مدیریت دقیق فعالیت‌های انسانی و برنامه‌ریزی حفاظتی است تا از بروز آلودگی و کاهش کیفیت آب جلوگیری شود و منابع آب پایدار حفظ گردد.

برای کاهش ریسک آلودگی منابع آب زیرزمینی، ضروری است کنترل و نظارت بر فعالیت‌های انسانی در حوضه افزایش یابد، به‌ویژه مدیریت دفن زباله، فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و تغییرات کاربری اراضی. اجرای پایش مستمر کیفیت آب و به‌روزرسانی دوره‌ای نقشه‌های آسیب‌پذیری می‌تواند به شناسایی به موقع نواحی پرخطر کمک کند. استفاده از مدل‌های ترکیبی و شاخص‌های یکپارچه برای تحلیل ریسک، دقت ارزیابی را افزایش می‌دهد و امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی مؤثر را فراهم می‌سازد. همچنین، تدوین سیاست‌های حفاظتی منطقه‌ای، محدود کردن توسعه در مناطق آسیب‌پذیر و اطلاع‌رسانی به ساکنان و نهادهای محلی، می‌تواند از تشدید آلودگی جلوگیری کند. این اقدامات، مبنای علمی و عملی برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی و تأمین آب پایدار برای نسل‌های آینده فراهم می‌آورد.

لازم به ذکر است که این مطالعه با محدودیت‌هایی مواجه بود؛ از جمله دقت داده‌های رقومی ارتفاعی و نقشه‌های زمین‌شناسی و همچنین فرضیات مدل‌های WLC و OWA که ممکن است تمامی پیچیدگی‌های هیدرولوژیکی آبخوان کارستیک را منعکس نکنند. علاوه بر این، تغییرات فصلی و اثرات اقلیمی بر جریان و کیفیت آب در مدل لحاظ نشده است، که می‌تواند بر دقت پهنه‌بندی آسیب‌پذیری تأثیرگذار باشد. در راستای تکمیل مطالعات مرتبط با موضوع مورد بررسی، پیشنهاد مطالعاتی زیر برای آینده ارائه می‌گردد: به‌کارگیری مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان آب و حرکت آلاینده‌ها در آبخوان کارستیک؛ انجام آزمایش‌های شیمیایی و ایزوتوپی بر روی نمونه‌های آب برای تشخیص دقیق منشأ آلاینده‌ها؛ راه‌اندازی شبکه پایش منظم و فصلی کیفیت آب در نقاط مختلف حوضه برای ارزیابی تغییرات زمانی؛ تهیه نقشه به‌روز شده کاربری اراضی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با جزئیات بیشتر؛ بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر میزان تغذیه آبخوان و پراکنش آلودگی در آینده و طراحی سناریوهای مدیریتی مانند محدودیت ساخت‌وساز، تصفیه فاضلاب و اصلاح الگوی کشت و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر کاهش آسیب‌پذیری.

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

### مشارکت نویسندگان

نویسندگان به صورت مشترک در انجام همه مراحل پژوهش مشارکت داشته‌اند.

**اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش**  
نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزار هوش مصنوعی (AI) برای نگارش این مقاله استفاده نکرده‌اند.

### تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها بنا به درخواست نویسندگان در دسترس هستند.

### سپاسگزاری

نویسندگان مایل هستند از تمامی افراد، سازمان‌ها و مؤسساتی که در تهیه این مقاله مشارکت داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

### منابع

- احمدی‌فر، رقیه؛ موسوی، سید مرتضی و رحیم‌زادگان، مجید. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: دشت سراب). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۴(۳)، ۱-۲۰.  
<https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11929.2645>
- بیاتی خطیبی، مریم؛ رستمی، فائزه و ولیزاده کامران، خلیل. (۱۴۰۰). بررسی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، با کمک روش DRASTI و الگوریتم‌های فازی. هیدروژئومورفولوژی، ۸(۲۹)، ۸۷-۱۰۸.  
<https://doi.org/10.22034/hyd.2022.48201.1606>
- پیره، مهین؛ قدیمی، مهرنوش و گنجائیان، حمید. (۱۴۰۳). شناسایی مناطق کارست آسیب‌پذیر با استفاده از مدل COP (مطالعه موردی: حوزه آبریز تکاب). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۵(۳)، ۹۵-۱۱۲.  
<https://doi.org/10.22108/gep.2024.141035.1640>
- جمینی، داود؛ شهابی، هیمین؛ نظری، حمید و آتش بهار، رامین. (۱۴۰۲). شناسایی سکونتگاه‌های روستایی در معرض خطر وقوع زمین‌لغزش در زیست بوم‌های عشایری (مطالعه موردی: شهرستان پاوه). مطالعات برنامه ریزی قلمرو کوچ نشینان. ۳(۱)، ۱۰۷-۱۲۲.  
<https://doi.org/10.22034/jsnap.2023.410697.1066>
- حجازی، اسداله و حیدری، زهرا. (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه بندی مناطق توسعه یافته و مستعد آلودگی کارستیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز روانسر). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۲۳(۶۸)، ۳۱۳-۳۲۶.  
<https://doi.org/10.52547/jgs.23.68.313>
- سعادت، حسین؛ ملکیان، آرش و مقدم‌نیا، علیرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی آسیب‌پذیری و پهنه‌بندی ریسک آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل. مدیریت آب و آبیاری، ۱۰(۱)، ۱۵۷-۱۷۱.  
<https://doi.org/10.22059/jwim.2020.298424.770>
- صادقی، حجت و جوان، فرهاد. (۱۴۰۴). آسیب پذیری روستاهای گردشگری ایران از لحاظ مخاطره زمین‌لغزش با استفاده از GIS. مجله جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۳۳(۸۴)، ۱۷۰-۱۵۳.  
<https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2055364.1385>
- صفاری، امیر؛ گنجائیان، حمید؛ حیدری، زهرا و فریدونی کردستان، مژده. (۱۳۹۷). تعیین مناطق کارست توسعه یافته با استفاده از مدل‌های منطق فازی و OWA در حوضه قرقه سو. هیدروژئومورفولوژی، ۵(۱۵)، ۹۵-۱۱۴.  
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1397.5.15.6.2>
- گنجائیان، حمید؛ نصرتی، مژگان؛ ابراهیمی، عطیرین و قیصریان، سیدسعدی. (۱۴۰۴). ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری روستاهای مناطق کوهستانی در برابر مخاطرات طبیعی (مطالعه موردی: روستاهای منطقه اورامان). پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۱(۲)، ۷۰-۵۷.  
<https://doi.org/10.22034/ermr.2024.63510>

- مختاری، داود؛ زنگنه تبار، زهرا و مطاعی، سارا. (۱۴۰۲). شناسایی مناطق کارستیک در معرض مخاطرات ناشی از آلودگی (مطالعه موردی: حوضه آبریز روانسر). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳(۳)، ۹۸-۸۱. <https://doi.org/10.22067/geoch.2023.74166.1210>
- نجم الدینی، ایرج. (۱۴۰۴). زمین گاه‌نگاری پیدایش اشکال ژئومورفولوژی در قلمروهای کوهستانی به روش سازندی - ساختاری (مطالعه موردی: غار کرفتو، استان کردستان). *پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی*، ۱(۲)، ۳۴-۲۵. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63619>
- Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B., & Loborec, J. (2021). Karst aquifer vulnerability assessment (KAVA) method—a novel GIS-based method for deep karst aquifers. *Sustainability*, 13(6), 3325. <https://doi.org/10.3390/su13063325>
- Cusano, D., Coda, S., & De Vita, P. (2023). A comparison of methods for assessing groundwater vulnerability in karst aquifers: The case study of Terminio Mt. aquifer (Southern Italy). *Sustainable Environment Research*, 33, 42. <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00204-8>
- Duan, X. C., Sun, Z. G., Li, S. H., Jiang, Z. C., & Liao, H. W. (2023). Hydrogeochemical characteristics and environment quality assessment of karst groundwater in Mengzi Basin of Yunnan Province, China. *Water*, 15(11), 2126. <https://doi.org/10.3390/w15112126>
- Eastman, J. R. (2003). *IDRISI Kilimanjaro guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Ghadimi, M., Zangenehtabar, S., Malekian, A., & Kiani, M. (2022). Groundwater vulnerability assessment in a karst aquifer: A case study of western Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03956-9>
- Gomez, M. M., Liedl, R., Stefan, C., & Pacheco, J. (2024). Theoretical analysis and considerations of the main parameters used to evaluate intrinsic karst groundwater vulnerability to surface pollution. *Science of the Total Environment*, 907, 167947. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167947>
- Hou, D. Y. (2022). Ten grand challenges for groundwater pollution prevention and remediation at contaminated sites in China. *Research of Environmental Sciences*, 35(9), 2015–2025. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.04.18>
- Jain, H. (2023). Groundwater vulnerability and risk mitigation: A comprehensive review of the techniques and applications. *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100968. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100968>
- Kaur, K., Mor, S., Vig, N., & Ravindra, K. (2022). Assessing the risk of landfill leachate on the groundwater quality of Chandigarh. *Journal of Environmental Biology*, 43(4), 593–603. <https://doi.org/10.22438/jeb/43/4/MRN-2097>
- Liu, J., Wu, J., Rong, S., & Teng, Y. (2022). Groundwater vulnerability and groundwater contamination risk in karst area of Southwest China. *Sustainability*, 14(21), 14483. <https://doi.org/10.3390/su142114483>
- Maghsoudi, M., Ganjaeian, H., Talari, A., & Amani, K. (2016). Evaluation of the contributing factors in development and zoning karst in Palangan Zone by using fuzzy logic and ANP. *Open Journal of Geology*, 6, 468–483. <https://doi.org/10.4236/ojg.2016.66039>
- Marin, A., Ravbar, I., Gregor, N., Bartolomé, K., & Petric, A. (2014). Application of methods for resource and source vulnerability mapping in the Orehek karst aquifer, SW Slovenia. *Springer International Publishing Switzerland*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06139-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06139-9_10)
- Mudarra, M., & Andreo, B. (2011). Relative importance of the saturated and the unsaturated zone in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). *Journal of Hydrology*, 397(3), 263–280. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.005>
- Parise, M., & Gunn, J. (2007). Natural and anthropogenic hazards in karst areas: An introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 279(1). <https://doi.org/10.1144/SP279.1>
- Parise, M., Gabrovšek, F., Kaufmann, G., & Ravbar, N. (2015). Hazards in karst and managing water resources quality. *Hydrogeology Journal*, 23(6), 1341–1344. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_17)
- Pereira, D. L., Galvão, P., Lucon, T., & Fujaco, M. A. (2019). Adapting the EPIK method to Brazilian hydro(geo)logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*, 90, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>
- Petrović, B., Vasić, L., Milanović, S., & Marinović, V. (2025). Epikarst flow dynamics and contaminant attenuation: Field and laboratory insights from the Suva Planina karst system. *Hydrology*, 12(11), 276. <https://doi.org/10.3390/hydrology12110276>
- Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M., & Grasemann, B. (2008). Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Environmental Earth Sciences*, 58(2), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1605-5>

- Ravbar, N., & Goldscheider, N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsologica*, 36(3), 397–411. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.174>
- Sadeghi, H. O., & Seidaei, S. (2023). Tourism and rural development. *Rural Areas—Development and Transformations*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111400>
- Vogelbacher, A., Kazakis, N., Voudouris, K., & Bold, S. (2019). Groundwater vulnerability and risk assessment in a karst aquifer of Greece using EPIK method. *Environments*, 6(11), 116. <https://doi.org/10.3390/environments6110116>
- Yin, L., Xu, B., Cai, W., Zhou, P., & Yang, L. (2023). Intrinsic vulnerability assessment of the Qingduo Karst System, Henan Province. *Water*, 15(19), 3425. <https://doi.org/10.3390/w15193425>

## References

- Ahmadifar, R., Mousavi, M., & Rahimzadegan, M. (2017). Mapping the risk of groundwater pollution using GIS (case study: Sarab plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(3), 1–20. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11929.2645> (In Persian)
- Bayatikhatibi, M., Rostami, F., & Valizadeh Kamran, Kh. (2022). Investigation and assessment of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC model and fuzzy logic. *Journal of Hydrogeomorphology*, 8(29), 87–108. <https://doi.org/10.22034/hyd.2022.48201.1606> (In Persian)
- Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B., & Loborec, J. (2021). Karst aquifer vulnerability assessment (KAVA) method—a novel GIS-based method for deep karst aquifers. *Sustainability*, 13(6), 3325. <https://doi.org/10.3390/su13063325>
- Cusano, D., Coda, S., & De Vita, P. (2023). A comparison of methods for assessing groundwater vulnerability in karst aquifers: The case study of Terminio Mt. aquifer (Southern Italy). *Sustainable Environment Research*, 33, 42. <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00204-8>
- Duan, X. C., Sun, Z. G., Li, S. H., Jiang, Z. C., & Liao, H. W. (2023). Hydrogeochemical characteristics and environment quality assessment of karst groundwater in Mengzi Basin of Yunnan Province, China. *Water*, 15(11), 2126. <https://doi.org/10.3390/w15112126>
- Eastman, J. R. (2003). *IDRISI Kilimanjaro guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Ganjaeian, H., Nosrati, M., Ebrahimi, A., & Ghisarian, S. S. (2025). Assessing the vulnerability of rural areas against natural hazards (case study: Villages of Oraman Region). *Environmental Research in Mountainous Regions*, 1(2), 57–70. <https://doi.org/10.22034/ermr.2024.63510> (In Persian)
- Ghadimi, M., Zangenehtabar, S., Malekian, A., & Kiani, M. (2022). Groundwater vulnerability assessment in a karst aquifer: A case study of western Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12). <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03956-9>
- Gomez, M. M., Liedl, R., Stefan, C., & Pacheco, J. (2024). Theoretical analysis and considerations of the main parameters used to evaluate intrinsic karst groundwater vulnerability to surface pollution. *Science of the Total Environment*, 907, 167947. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167947>
- Hejazi, A., & Heidari, Z. (2023). Vulnerability assessment and zoning of developed and susceptible contaminated karstic (case study: Ravenscar watershed). *Applied Research in Geographical Sciences*, 23(68), 313–326. <https://doi.org/10.52547/jgs.23.68.313> (In Persian)
- Hou, D. Y. (2022). Ten grand challenges for groundwater pollution prevention and remediation at contaminated sites in China. *Research of Environmental Sciences*, 35(9), 2015–2025. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2022.04.18>
- Jain, H. (2023). Groundwater vulnerability and risk mitigation: A comprehensive review of the techniques and applications. *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100968. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100968>
- Jamini, D., Shahabi, H., Nazari, H., & Atashbahar, R. (2023). Identifying rural settlements at risk of landslides in nomadic ecosystems (case study: Paveh County). *Nomadic Territory Planning Studies*, 3(1), 107–122. <https://doi.org/10.22034/jsnap.2023.410697.1066> (In Persian)
- Kaur, K., Mor, S., Vig, N., & Ravindra, K. (2022). Assessing the risk of landfill leachate on the groundwater quality of Chandigarh. *Journal of Environmental Biology*, 43(4), 593–603. <https://doi.org/10.22438/jeb/43/4/MRN-2097>
- Liu, J., Wu, J., Rong, S., & Teng, Y. (2022). Groundwater vulnerability and groundwater contamination risk in karst area of Southwest China. *Sustainability*, 14(21), 14483. <https://doi.org/10.3390/su142114483>
- Maghsoudi, M., Ganjaeian, H., Talari, A., & Amani, K. (2016). Evaluation of the contributing factors in development and zoning karst in Palangan Zone by using fuzzy logic and ANP. *Open Journal of Geology*, 6, 468–483. <https://doi.org/10.4236/ojg.2016.66039>

- Marin, A., Ravbar, I., Gregor, N., Bartolomé, K., & Petric, A. (2014). Application of methods for resource and source vulnerability mapping in the Orehek karst aquifer, SW Slovenia. *Springer International Publishing Switzerland*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06139-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06139-9_10)
- Mokhtari, D., Zanganehtabar, Z., & Mataee, S. (2023). Identifying karstic areas exposed to hazards caused by pollution (case study: Ravansar Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 81–99. <https://doi.org/10.22067/geoh.2023.74166.1210> (In Persian)
- Mudarra, M., & Andreo, B. (2011). Relative importance of the saturated and the unsaturated zone in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). *Journal of Hydrology*, 397(3), 263–280. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.005>
- Najmoddini, I. (2025). Geochronology of geomorphological features existence in mountainous regions with formational-structural method (case study: Karaftou Cave, Kurdistan Province). *Environmental Research in Mountainous Regions*, 1(2), 25–34. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63619> (In Persian)
- Parise, M., & Gunn, J. (2007). Natural and anthropogenic hazards in karst areas: An introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 279(1). <https://doi.org/10.1144/SP279.1>
- Parise, M., Gabrovšek, F., Kaufmann, G., & Ravbar, N. (2015). Hazards in karst and managing water resources quality. *Hydrogeology Journal*, 23(6), 1341–1344. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_17)
- Pereira, D. L., Galvão, P., Lucon, T., & Fujaco, M. A. (2019). Adapting the EPIK method to Brazilian hydro(geo)logical context of the São Miguel watershed to assess karstic aquifer vulnerability to contamination. *Journal of South American Earth Sciences*, 90, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>
- Petrović, B., Vasić, L., Milanović, S., & Marinović, V. (2025). Epikarst flow dynamics and contaminant attenuation: Field and laboratory insights from the Suva Planina karst system. *Hydrology*, 12(11), 276. <https://doi.org/10.3390/hydrology12110276>
- Pireh, M., Ghadimi, M., & Ganjaeian, H. (2024). Identification of vulnerable karst areas using the COP model (case study: Tekab Basin). *Geography and Environmental Planning*, 35(3), 95–112. <https://doi.org/10.22108/gep.2024.141035.1640> (In Persian)
- Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M., & Grasemann, B. (2008). Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Environmental Earth Sciences*, 58(2), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1605-5>
- Ravbar, N., & Goldscheider, N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsologica*, 36(3), 397–411. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.174>
- Saadati, H., Malekian, A., & Moghaddamnia, A. (2020). Assessment of vulnerability index and risk zoning in Ardabil Plain. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 157–171. <https://doi.org/10.22059/jwim.2020.298424.770> (In Persian)
- Sadeghi, H. O., & Seidaiy, S. (2023). Tourism and rural development. *Rural Areas—Development and Transformations*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111400>
- Sadeghi, H., & Javan, F. (2025). Vulnerability of Iranian tourism villages in terms of landslide hazard using GIS. *Geography*, 23(84), 153–170. <https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2055364.1385> (In Persian)
- Sasfari, A., Ganjaeian, H., Heidary, Z., & Fraidoni Kordestani, M. (2018). The determination of the developed karst regions using fuzzy logic and OWA models in Qaresou Basin. *Journal of Hydrogeomorphology*, 5(15), 95–114. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1397.5.15.6.2> (In Persian)
- Vogelbacher, A., Kazakis, N., Voudouris, K., & Bold, S. (2019). Groundwater vulnerability and risk assessment in a karst aquifer of Greece using EPIK method. *Environments*, 6(11), 116. <https://doi.org/10.3390/environments6110116>
- Yin, L., Xu, B., Cai, W., Zhou, P., & Yang, L. (2023). Intrinsic vulnerability assessment of the Qingduo Karst System, Henan Province. *Water*, 15(19), 3425. <https://doi.org/10.3390/w15193425>