نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 19, No. 71, Winter 2026

سال نوزدهم- شماره ۷۱- زمستان ۱۴۰۴

Locating Areas Susceptible to Groundwater Pollution Using Maximum Entropy Model (Case Study: Badavar Basin)

Ali Haghizadeh*[1], Zeinab Hajizadeh[2], Leila Ghasemi[3]

Received: 20-10-2025, Revised: 03-11-2025, Accepted: 11-11-2025, Published: 12-11-2025

https://doi.org/10.22034.19.71.2

Extended Abstract

Introduction

In arid and semi-arid regions, groundwater is a critical water source for industrial, agricultural, and drinking purposes, making its quality preservation vital for public health and sustainable development. The quality of this resource is significantly influenced by the complex interplay between human pressures such as pollution discharge and land-use changes and natural elements like topography and geology. A major environmental concern is the deterioration of groundwater quality due to excessive extraction and pollutant intrusion. Consequently, identifying vulnerable areas and conducting spatial risk zoning are essential processes in water resource management. Conventional models often have limitations in addressing these nonlinear, multivariate problems. The Maximum Entropy algorithm (MaxEnt), a powerful machine learning technique, is well-suited for this application due to its high capacity for analyzing presence-only data and modeling complex spatial patterns within a Geographic Information System (GIS) environment. The Badavar Basin, characterized by geological complexity and intensive land-use changes, is particularly vulnerable to contamination. The primary goal of this study is to employ the MaxEnt model to assess the regional pollution potential, determine the relative importance of various environmental factors, and generate a precise risk map to support management decisions. This research also highlights the importance of integrating scientific innovation with sustainable policy frameworks.

Materials and Methods

This study modeled groundwater contamination potential in the Badavar Basin using the Maximum Entropy (MaxEnt) model within a GIS framework. The input data consisted of pollution presence points, identified through sampling and monitoring of contaminated wells, and twelve environmental predictor variables. These variables were classified into three primary categories: land features (e.g., soil texture and geology), physiographic elements (e.g., slope, aspect, slope length, Topographic Wetness Index (TWI), and curvature), and distance/human factors (e.g., vegetation cover, distance from roads, distance from rivers, and land use). All variable layers were processed in GIS and converted to a raster format with a consistent resolution. The model was trained using 70% of the presence points, while the remaining 30% were reserved for testing and validation. The model's accuracy and performance were evaluated by calculating the Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve for both datasets. Furthermore, a Jackknife test was performed to assess the sensitivity and relative importance of each factor, thereby identifying the primary controlling mechanisms in pollution prediction. To strengthen the methodological framework, data preprocessing ensured consistency across spatial layers and minimized potential bias. The resulting outputs included contamination risk maps, which provide valuable insights for sustainable groundwater management and regional planning initiatives.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

Results and Discussion

The results from the MaxEnt model revealed the disproportionate contribution of various environmental factors to groundwater contamination likelihood. Geology was the most significant predictor, with a relative contribution of 36.7%, underscoring the importance of formation permeability and its hydrological role in controlling pollutant transport. Slope (17.7%) and distance from roads (12.6%) were the second and third most important factors, respectively, highlighting the significance of lateral pollutant transmission and anthropogenic influence across the basin. In contrast, factors such as aspect (0.2%) and elevation (0.0%) had a negligible impact.

According to the risk zoning map, areas classified with High and Very High contamination potential comprise approximately 7.6% of the basin's total area. The southern part of the Badavar Plain was identified as the zone of highest risk, attributable to its extensive alluvial deposits, gentle slopes, and the likely concentration of human activities. The model demonstrated strong performance and a good fit to the contamination patterns, as indicated by a training AUC of 0.85. However, the testing AUC score of 0.59 suggests potential overfitting and indicates a need for more comprehensive sampling and parameter tuning to improve model generalizability. These findings emphasize the necessity of integrating geological assessments with planning to mitigate contamination risks. Moreover, the spatial outputs generated by the model provide a valuable baseline for future hydrogeological investigations and targeted management strategies.

Conclusion

This study successfully demonstrated the efficacy of the Maximum Entropy (MaxEnt) algorithm as a reliable technique for spatially assessing groundwater pollution risk in the Badavar Basin. The findings reveal that geology is the predominant factor regulating contamination processes, underscoring the necessity for conservation measures focused on the main aquifers' permeable formations. Furthermore, the clear identification of the southern plain as a high-priority zone for monitoring and mitigation allows for optimal resource allocation. The model, with its acceptable accuracy on training data, proves to be a valuable tool for assessing aquifer susceptibility in regions with similar hydrological settings. Future research should aim to enhance model generalizability by resolving the performance discrepancy between the training and testing datasets, potentially through advanced parameterization and an improved spatial distribution of sampling points. Ultimately, the resulting risk map serves as a vital spatial decision-support tool, empowering water resource managers to implement targeted, proactive conservation strategies. This forward-looking approach is essential for safeguarding the long-term quality and sustainability of groundwater resources. In addition, integrating MaxEnt outputs with socio-economic and land-use data could provide a more holistic understanding of contamination drivers. Such integration would enable managers to design adaptive policies that balance environmental protection with regional development needs, ensuring resilience under future climatic and anthropogenic pressures.

Keywords: *MaxEnt, environmental factors, AUC, groundwater, pollution*

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The cooperation and assistance of Lorestan University is appreciated.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the writing or publication of the contents and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this study will be made available through correspondence with the corresponding author.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

Authors' Contribution

Ali Haghizadeh: Guidance, review, conceptualization, scientific supervision, software/statistical analyses, approval of the final version. Zeynab Hajizadeh: Data collection, modeling, article writing, editing and reviewing the article, performing software/ statistical analyses.Leila Ghasemi: Data collection, editing, conceptualization.

Citation: Haghizadeh A, Hajizadeh Z, Ghasemi L, Locating Areas Susceptible to Groundwater Pollution Using Maximum Entropy Model (Case Study: Badavar Basin). jwmseir 2025; 19 (71): 1-17

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, , Vol 19, No 71, PP 1-17

Publisher: Watershed Management Society of Iran
© Author(s)

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

مکان‌یابی نواحی مستعد آلودگی آب زیرزمینی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه بادآور)

علی حقی‌زاده[۱]، زینب حاجی‌زاده[۲]، لیلا قاسمی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸، تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱
https://doi.org/10.22034.19.71.2

چکیده

آلودگی آب زیرزمینی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی است که با ورود آلاینده‌های سطحی به سفره‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد. ایران به عنوان یک کشور خشک و نیمه خشک، بخش عمده‌ای از نیازهای آبی خود را از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌کند. بنابراین، ارزیابی وضعیت این منابع و شناسایی عوامل مؤثر بر آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق به منظور بررسی مکانیابی نواحی مستعد آلودگی آب زیرزمینی از مدل حداکثر آنتروپی (Max Ent) و عوامل فیزیوگرفی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، خاک، فاصله از رودخانه و جاده استفاده شده است. نتایج نشان داد که عامل زمین‌شناسی با ۳۶/۷ درصد سهم، مؤثرترین عامل شناخته شد. منحنی پاسخ نیز نشان داد که افزایش شیب و جهت شیب، احتمال آلودگی را افزایش می‌دهد، درحالی که افزایش ارتفاع و تنوع سازندهای زمین‌شناسی، آن را کاهش می‌دهد. آزمون جکنایف حساسیت مدل را ارزیابی کرد و نشان داد که زمین‌شناسی، شیب، طول شیب و بافت خاک مهم‌ترین پارامترها هستند. همچنین نتایج اعتبارسنجی با استفاده از منحنی ROC مقدار سطح زیر منحنی مدل ۰/۸۵ و ۰/۵۹ به ترتیب برای نمونه‌های آموزشی و آزمایشی را نشان داد که نشان‌دهنده سطح قابل‌قبول نتایج است. همچنین بر اساس نقشه پهنه‌بندی، جنوب دشت بالاترین پتانسیل وقوع آلودگی را دارد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل MaxEnt می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مؤثر برای مدیریت منابع آب زیرزمینی و تدوین راهبردهای حفاظتی در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، به‌کارگیری این مدل در ترکیب با داده‌های اجتماعی–اقتصادی و کاربری اراضی می‌تواند دید جامع‌تری از محرک‌های آلودگی فراهم کند و به سیاست‌گذاران در طراحی راهبردهای سازگار با تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی کمک نماید.

کلید واژه‌ها: حداکثر آنتروپی، عوامل محیطی، AUC، آب زیرزمینی، آلودگی

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: حقی‌زاده علی، حاجی‌زاده زینب، قاسمی لیلا. مکانیابی نواحی مستعد آلودگی آب زیرزمینی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه بادآور). علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۴؛ ۱۹(۷۱): ۱– ۱۷

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۴۰۴، دوره ۱۹، شماره ۷۱، ۱ تا ۱۷

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

© نویسندگان

۱- استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. نویسنده مسئول: haghizadeh.a@lu.ac.ir
۲- پژوهشگر پسا دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران
۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]
[DOI: 10.22034.19.71.2]

مقدمه

آب زیرزمینی یکی از منابع حیاتی تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی در جهان به شمار می‌آید و نقش مهمی در پایداری اکولوژیکی و توسعه پایدار ایفا می‌کند [٦]. با این حال، کیفیت این منابع به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار گرفته است؛ از جمله تغییرات اقلیمی، کاربری زمین، تخلیه آلاینده‌ها و رشد جمعیت [٢، ٤، ١٠، ٣٧، ٣٩، ٤٢]. حفظ سلامت انسان، بهره‌وری پایدار کشاورزی و پایداری بوم‌سازگان همگی به کیفیت مناسب آب وابسته‌اند [٢٥، ٣٠، ٣٦]. از دیرباز، منابع آب زیرزمینی به خاطر دمای پایدار، آلودگی کمتر و قابلیت اطمینان بالا به عنوان منبعی مطمئن برای انسان‌ها شناخته شده‌اند، اما در سال‌های اخیر به دلیل برداشت‌های بیش از حد نسبت به تجدیدپذیری آن‌ها، با مشکلات کیفی و کمی مواجه شده‌اند [١١]. تقریباً ٢/٥ میلیارد نفر در جهان به منابع آب زیرزمینی به عنوان منبع اصلی آب خود وابسته‌اند [٨]. در ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی باعث شده است که بیش از ٧٥٪ آب مصرفی در بخش کشاورزی از این منابع تأمین شود [٥]. این وابستگی، همراه با توسعه صنعتی و تخلیه فاضلاب‌های شهری و کشاورزی، منجر به افت کیفیت و کمیت آب زیرزمینی شده است [٣، ١٧، ٢٣].

کیفیت آب زیرزمینی تحت‌تأثیر عوامل متعددی قرار دارد، از جمله ورود فاضلاب، استفاده از کودهای شیمیایی، نشت از شبکه‌های نفتی و محل‌های دفن زباله. همچنین، شرایط هیدروژئولوژیکی و ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان‌ها بر تغییر کیفیت آب زیرزمینی در مناطق مختلف تأثیرگذار است. فرایند انحلال مواد معدنی در خاک نیز می‌تواند کیفیت آب را تغییر دهد؛ برای مثال، آب‌هایی با غلظت بالای کلر طعمی شور و آب‌هایی با سولفات سدیم و منیزیم طعمی تلخ و گس پیدا می‌کنند.

در پاسخ به این چالش‌ها، مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های مختلف ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی انجام شده‌اند؛ از جمله منطق فازی [٢٩]، مدل‌سازی خاکستری [٢١]، تحلیل سلسله‌مراتبی [٢٩]، تحلیل خوشه‌ای (CA)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و شاخص کیفیت آب با وزن یکپارچه (IWQI) [١٥]. با وجود این، بسیاری از این روش‌ها نیازمند داده‌های گسترده، زمان زیاد و نیروی انسانی هستند و در برخی موارد توانایی محدودی در مدل‌سازی فضایی و پیش‌بینی نواحی پرخطر دارند.

مدل حداکثر آنتروپی MaxEnt یکی از روش‌های پرکاربرد و مؤثر در مدل‌سازی فضایی و پیش‌بینی نواحی مستعد وقوع پدیده‌های محیط‌زیستی است. این مدل به‌ویژه در شرایطی که داده‌های موجود تنها شامل نقاط حضور پدیده موردنظر هستند، عملکرد قابل‌اتکایی دارد. برخلاف بسیاری از روش‌های یادگیری ماشین که نیازمند داده‌های حضور و عدم حضور یا حجم بالایی از داده‌های آموزشی هستند، MaxEnt با بهره‌گیری از اصول نظریه اطلاعات و بدون نیاز به داده‌های منفی، قادر است توزیع احتمالی پدیده را با دقت بالا مدل‌سازی کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که MaxEnt در بسیاری از موارد عملکردی قابل‌مقایسه یا حتی بهتر از روش‌های یادگیری ماشین دارد، به‌ویژه زمانی که داده‌های حضور محدود باشند و هدف، تفسیرپذیری نتایج است [١٣، ٢٨، ٣٣].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی با هدف ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و شناسایی مناطق مستعد آلودگی انجام شده‌اند. برای مثال، گومز و همکاران [١٨] با تمرکز بر تغییرات کاربری زمین (LULC)، نشان دادند که افزایش تغییرات کاربری می‌تواند منجر به افت کیفیت آب زیرزمینی شود. بااین‌حال، مطالعه آن‌ها فاقد تحلیل مکانی دقیق و مدل‌سازی پیش‌بینی گر برای تعیین نواحی پرخطر بود. رحمتی و همکاران [٣٤] از مدل‌های جنگل تصادفی و حداکثر آنتروپی برای تولید نقشه‌های رقومی پتانسیل آب زیرزمینی استفاده کردند، اما تمرکز آن‌ها بیشتر بر پتانسیل کمی منابع آب بود تا مکان‌یابی آلودگی کیفی. در همین راستا، رزندی و همکاران [٣٥] نیز از مدل MaxEnt برای شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در دشت همدان بهره گرفتند، اما متغیرهای مورد استفاده آن‌ها عمدتاً زمین‌شناسی و توپوگرافی بود و به متغیرهای عوامل محیطی و انسانی توجهی نشده بود.

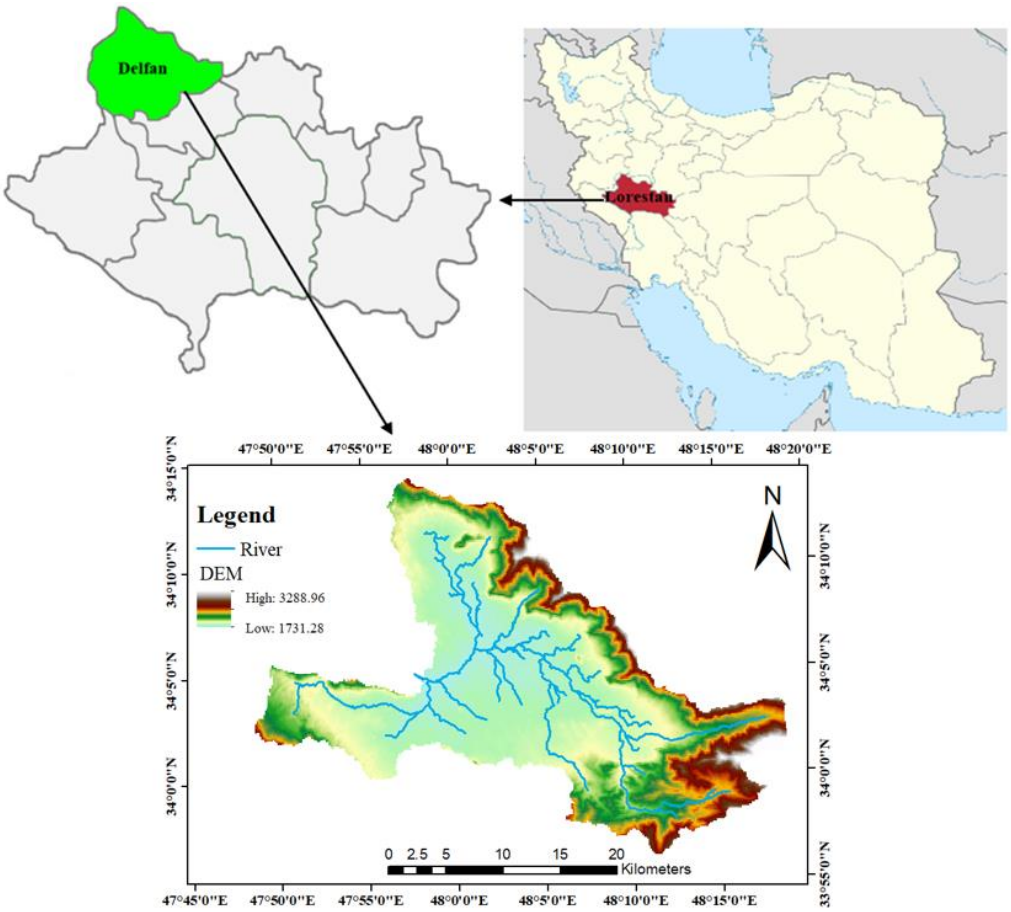
در مطالعات بین‌المللی نیز، یو و همکاران [٣٢] با استفاده از آنتروپی وزنی، کیفیت آب در منطقه دونگ‌شینگ چین را ارزیابی کردند، جیائو و همکاران [١٥] نیز در دلتای مک‌دونگ ویتنام از روش‌های آماری مانند PCA و CA استفاده کردند، اما این روش‌ها بیشتر برای تحلیل خوشه‌ای داده‌ها مناسب‌اند و توانایی محدودی در مدل‌سازی فضایی دارند.

حوضه رودخانه بادآور در شهرستان نورآباد استان لرستان، یکی از مناطق حساس از نظر منابع آب سطحی و زیرزمینی است که در سال‌های اخیر با چالش‌های متعددی در زمینه کیفیت آب مواجه بوده است. مطالعات ژئوشیمیایی پیشین در این منطقه نشان داده‌اند که ترکیب شیمیایی آب تحت تأثیر هم‌زمان عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد. از جمله عوامل طبیعی می‌توان به انحلال کانی‌هایی مانند هالیت، ژیپس و انیدریت و همچنین فرایندهای تبادل یونی و ته‌نشست کربنات‌ها اشاره کرد که موجب افزایش غلظت یون‌هایی نظیر سدیم، کلرید و سولفات در آب می‌شوند [١٩].

از سوی دیگر، تخلیه فاضلاب‌های خانگی و رواناب‌های کشاورزی به رودخانه بادآور، به‌ویژه در فصول بارندگی، باعث ورود آلاینده‌هایی مانند نیترات، فسفات و عناصر بالقوه سمی به منابع آب سطحی و در نهایت نفوذ آن‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی شده است. این شرایط، به‌ویژه در مناطقی با نفوذپذیری بالای خاک و ارتباط هیدرولیکی بین رودخانه و آبخوان‌ها، می‌تواند منجر به افت کیفیت آب زیرزمینی و تهدید سلامت مصرف‌کنندگان شود. با توجه به وابستگی جوامع محلی به منابع آب زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی، ضرورت بررسی دقیق کیفیت آب زیرزمینی در این حوضه بیش از پیش احساس می‌شود. انتخاب حوضه بادآور برای

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان لرستان

Fig1- Location of the study area in Iran and Lorestan Province

این پژوهش، بر پایه شواهد مستند از آلودگی‌های موجود و اهمیت حیاتی منابع آبی آن برای منطقه صورت گرفته است.

مرور منابع نیز نشان می‌دهد که اگرچه مدل MaxEnt در برخی مطالعات به‌کار رفته، اما کاربرد آن برای مکان‌یابی نواحی مستعد آلودگی آب زیرزمینی با تمرکز بر متغیرهای عوامل محیطی و انسانی در حوضه رودخانه بادآور لرستان تاکنون انجام نشده است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ دانشی، برای نخستین‌بار از مدل MaxEnt در این منطقه استفاده می‌کند تا با بهره‌گیری از داده‌های چندمنظوره، نقشه‌ای دقیق از نواحی پرخطر آلودگی ارائه دهد و ابزار تصمیم‌سازی مؤثری برای مدیریت منابع آب زیرزمینی فراهم آورد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی نورآباد با وسعت حدود ۶۰۰ کیلومترمربع یکی از زیرحوضه‌های رودخانه کرخه در استان لرستان است که بین طول‌های ′۲۰، °۴۷ تا ′۲۰، °۴۸ شرقی و عرض‌های ′۵۵، °۳۳ تا ′۲۰، °۳۴ شمالی در شمال‌غربی استان واقع شده است (شکل ۱). اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن، مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب تعیین شده و میانگین بارش ده‌ساله (۱۳۸۶–۱۳۹۶) ایستگاه بادآور نورآباد برابر با ۵۳۸ میلی‌متر گزارش شده است [۲۷]. متوسط ارتفاع در سطح دشت و ارتفاعات به ترتیب برابر با ۱۸۷۰ و ۱۹۶۰ متر است. دمای متوسط حوضه ۱۰/۵۰ درجه سانتی‌گراد، متوسط حداکثر دمای متوسط سالیانه ۲۳/۵ سانتی‌گراد و حداقل دمای متوسط سالیانه ۱۲ درجه سانتی‌گراد است. از نظر زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی، منطقه شامل دو واحد اصلی است: آبرفت‌های جوان در دشت نورآباد با نفوذپذیری بالا، و سازندهای آهکی، مارنی و ماسه‌سنگی در ارتفاعات اطراف که نقش مهمی در تغذیه آبخوان دارند. آبخوان اصلی منطقه از نوع آزاد بوده و در برخی نواحی کوهستانی، شرایط نیمه‌تحت‌فشار نیز مشاهده می‌شود. ویژگی‌های هیدرولیکی سازندهای آبرفتی شامل ضریب هدایت هیدرولیکی بالا و ظرفیت ذخیره مناسب است که موجب حساسیت بالای این آبخوان به ورود آلاینده‌ها می‌شود. جهت جریان عمومی آب زیرزمینی در منطقه از شمال‌غرب و جنوب‌شرق به سمت مرکز و خروجی بوده و مناطق تغذیه عمدتاً در ارتفاعات شمالی و غربی حوضه قرار دارند. تخلیه آبخوان در بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت صورت می‌گیرد، جایی که رودخانه بادآور نیز جریان دارد.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

روش تحقیق

این مطالعه بر اساس یک روش‌شناسی چهار مرحله‌ای انجام شد. در مرحله اول، یک فایل وکتور نقطه‌ای ایجاد شد که مکان‌های مشخص برای نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. داده‌های نقطه‌ای از ۲۱ حلقه چاه آب زیرزمینی در محدوده نورآباد لرستان مورد استفاده قرار گرفت. این چاه‌ها به‌صورت تصادفی از میان چاه‌های موجود در منطقه انتخاب شدند تا از سوگیری در نمونه‌برداری جلوگیری شود و نماینده‌ای از شرایط متنوع هیدروژئوشیمیایی منطقه باشند. داده‌های کیفی مربوط به این چاه‌ها از طریق پایش میدانی گردآوری شده‌اند.

در مرحله دوم، ۱۲ عامل تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی به فرمت رستری تبدیل و فضایی‌سازی شدند. تمام لایه‌های رستری به رزولوشن یکسان ۳۰ متر بازنمونه‌برداری شدند و سیستم مختصات UTM Zone 39N با Datum WGS 1984 برای یکسان‌سازی فضایی استفاده شد. تبدیل و استانداردسازی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8 و SAGA GIS 6.0 انجام گرفت.

در مرحله سوم، با استفاده از الگوریتم MaxEnt، همبستگی بین ویژگی‌های نقطه‌ای چاه‌ها و عوامل محیطی ایجاد شد که منجر به تولید نقشه‌های آلودگی شد. خروجی مدل به‌صورت نقشه احتمال حضور کیفیت نامطلوب آب زیرزمینی تولید شد. برای طبقه‌بندی مقادیر پیوسته خروجی مدل به کلاس‌های «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد»، از روش طبقه‌بندی طبیعی[1] استفاده شد که بر اساس خوشه‌بندی آماری داده‌ها عمل می‌کند و از روش‌های رایج در تحلیل‌های مکانی محسوب می‌شود.

در نهایت، در مرحله چهارم، عملکرد مدل از طریق منحنی ROC و روش‌های اعتبارسنجی متقابل ارزیابی و تأیید شد.

متغیرهای محیطی تأثیرگذار

به‌طورکلی، کیفیت آب زیرزمینی در یک آبخوان به پارامترهای مؤثر مختلفی بستگی دارد که تعداد پارامترهای مورد بررسی در یک پژوهش به دسترسی به داده‌ها در منطقه وابسته است. برای تعیین آلودگی آب زیرزمینی و بر اساس مرور منابع گسترده در این زمینه، عوامل تأثیرگذار مانند معیارهای فیزیوگرافی، کاربری اراضی و نقشه زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفتند. معیارهای فیزیوگرافی شامل شیب، جهت شیب، طول شیب و انحنای شیب بر اساس مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 محاسبه شدند. برای تعیین دیگر معیارهای فیزیوگرافی، از جمله شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) از نرم‌افزار SAGA GIS 6.0 استفاده شد. در این پژوهش، نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز کرخه با استفاده از تصاویر Copernicus در سامانه Google Earth Engine در سال ۲۰۱۹ تهیه شد. این نقشه با دقت بالا و تفکیک‌پذیری ۲۲ کلاس کاربری مختلف، دید جامعی از پوشش گیاهی، مناطق کشاورزی، مناطق مسکونی، آب‌های سطحی و سایر کاربری‌های زمین در این حوضه ارائه می‌دهد. تصاویر ماهواره‌ای Copernicus به دلیل کیفیت بالا، پوشش گسترده و به‌روزرسانی مداوم، ابزاری قدرتمند برای پایش تغییرات کاربری اراضی محسوب می‌شوند. همچنین، نقشه زمین‌شناسی از سازمان زمین‌شناسی کشور دریافت شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی MaxEnt نواحی دارای آلودگی آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. تنظیمات مدل به‌صورت زیر انجام گرفت: Regularization Multiplier: در فرایند مدل‌سازی، مقدار این پارامتر در چهار سطح ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ بررسی شد. نتایج حاصل از این مقادیر تفاوت معناداری در عملکرد مدل نشان ندادند (بر اساس معیارهای AUC)؛ بنابراین، مقدار ۱ به‌عنوان مقدار نهایی انتخاب شد که با مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار نیز مطابقت دارد. نوع Feature(Auto)، همچنین مدل با تعداد پنج تکرار اجرا شد تا اثرات تصادفی کاهش یابد و پایداری نتایج بررسی شود و برای تحلیل نهایی، از خروجی با عملکرد بهتر (بر اساس AUC) استفاده شد. فرمت خروجی نیز (Logistic) است.

مدل حداکثر آنتروپی

الگوریتم حداکثر آنتروپی که بر اساس مفاهیم ترمودینامیک طراحی شده است، یک مدل‌سازی مبتنی بر یادگیری ماشین است که تنها به نقاط حضور وابسته است و توانایی ارزیابی احتمال توزیع حداکثر آنتروپی را با توجه به عوامل محیطی مؤثر بر توزیع مکانی پدیده مورد نظر دارد. این الگوریتم با استفاده از اصل استفان بولتزمن (رابطه مستقیم بین درجه آشفتگی و آنتروپی سیستم)، در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی، عملکرد بهتری در پیش‌بینی حضور پدیده‌های مورد نظر ارائه می‌دهد. در فرایند مدل‌سازی، می‌توان هم متغیرهای کلاسه‌بندی شده و هم متغیرهای پیوسته را مورد توجه قرار داد. یکی از مزیت‌های برجسته این مدل، شناسایی مهم‌ترین عامل مؤثر بر پدیده مورد نظر است [۸، ۳٤]. این مدل به عنوان یک روش یادگیری ماشین شناخته می‌شود که امکان بررسی روابط بین یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل را فراهم می‌آورد.

اصل حداکثر آنتروپی

مراحل محاسبه حداکثر آنتروپی به این صورت است که اگر x یک متغیر تصادفی با توزیع پیوسته است، آنگاه آنتروپی به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$E(x) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} m(x) \log[m(x)]\, dx \qquad (1)$$

E (x) آنتروپی سیستم

m (x) تابع چگالی احتمال

C ثابت مثبت است که به‌صورت فاکتور مقیاس تعریف شده

1. Natural Breaks – Jenks

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

و به انتخاب واحد اندازه‌گیری وابسته است. مفهوم آنتروپی را می‌توان برای جفت متغیرهای (x, y) از طریق آنتروپی توأم تعمیم داد که به‌صورت رابطهٔ ۲ بیان می‌شود:

$$E(x) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} m(x,y) \log[m(x,y)]\, dxdy \quad (۲)$$

E (x, y) آنتروپی توام سیستم

m (x, y) تابع چگالی احتمال توام x و y

آنتروپی یک سیستم را می‌توان با استفاده از روش بهینه‌سازی کلاسیک برای استخراج تابع توزیع احتمال، بهینه نمود. اطلاعات مورد نیاز برای استخراج تابع توزیع اساساً بر حسب محدودیت‌هایی است که بر اساس داده‌های مشاهداتی، تجربه، روابط ریاضی یا از هر منبع دیگر استخراج شده‌اند[۱].

محدودیت‌های زیر (روابط ۳ تا ٦) برای بهینه‌سازی آنتروپی توأم E (x, y) در نظر گرفته می‌شوند:

$$\sum_{x.y} m(x.y) = 1 \quad (۳)$$

$$\sum_{x.y} xm(x.y) = \bar{x} \quad (٤)$$

$$\sum_{x.y} ym(x.y) = \bar{y} \quad (٥)$$

$$\sum_{x.y} xym(x.y) = Txy\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad (٦)$$

m (x, y) تابع چگالی احتمال توام x و y

x و y میانگین‌های مربوطه

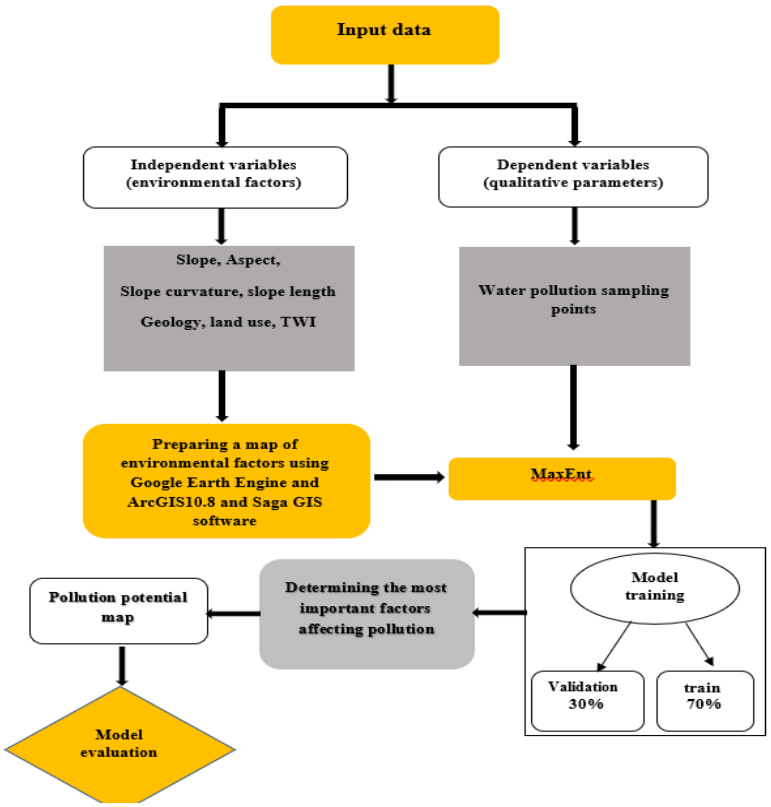
$T_{x,y}$ کوواریانس بین x و y

درنهایت، برای بهینه‌سازی از تابع آنتروپی توأم دیفرانسیل گرفته و معادل صفر (رابطهٔ ۷) قرار داده می‌شود.

$$d(E(x)) = -(\sum_{x\,y} [1 + lnmxy]dm\,(xy)) = 0 \quad (۷)$$

ارزیابی دقت مدل

منحنی ROC یک ابزار علمی برای ارزیابی کارایی سیستم‌های شناسایی و پیش‌بینی است. این منحنی برای داده‌های آزمون و آزمایشی در نظر گرفته می‌شود و مقادیر آن بین ۰ تا ۱ متغیر است. هر چه مقدار به ۱ نزدیک‌تر هست، دقت مدل بالاتر است. AUC یا مساحت زیر منحنی ROC، معیاری برای سنجش توانایی مدل‌ها برای طبقه‌بندی باینری است و توانایی و عدم اطمینان مدل‌ها را برای تهیه نقشه مورد نظر با استفاده از سطح زیر منحنی ROC بررسی می‌کند. به‌طورکلی، اگر AUC بیشتر از ۷۰ درصد است، دقت مدل قابل قبول تلقی می‌شود [١٤]. فلوچارت پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

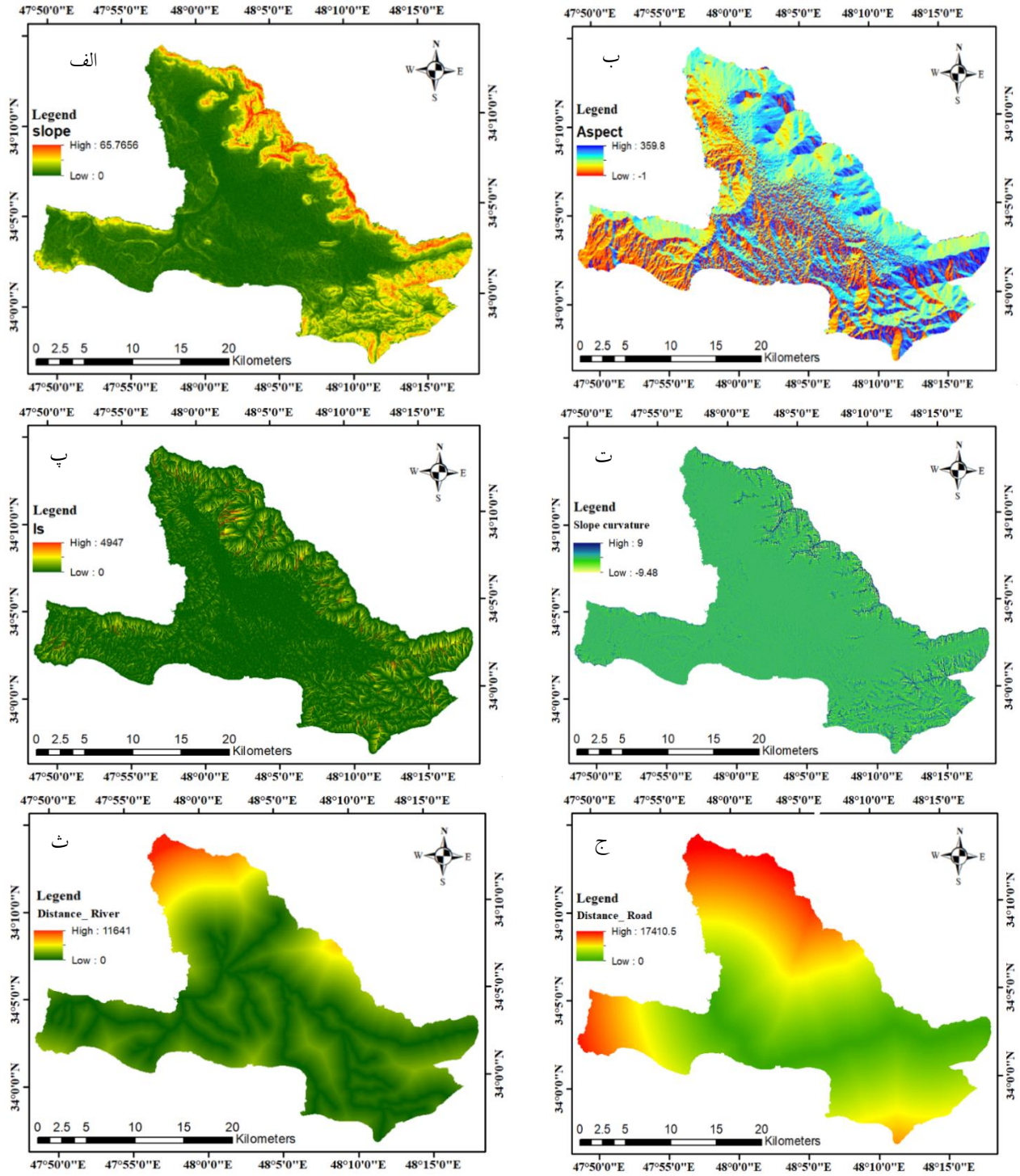
Fig 2 - Flowchart of research steps

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

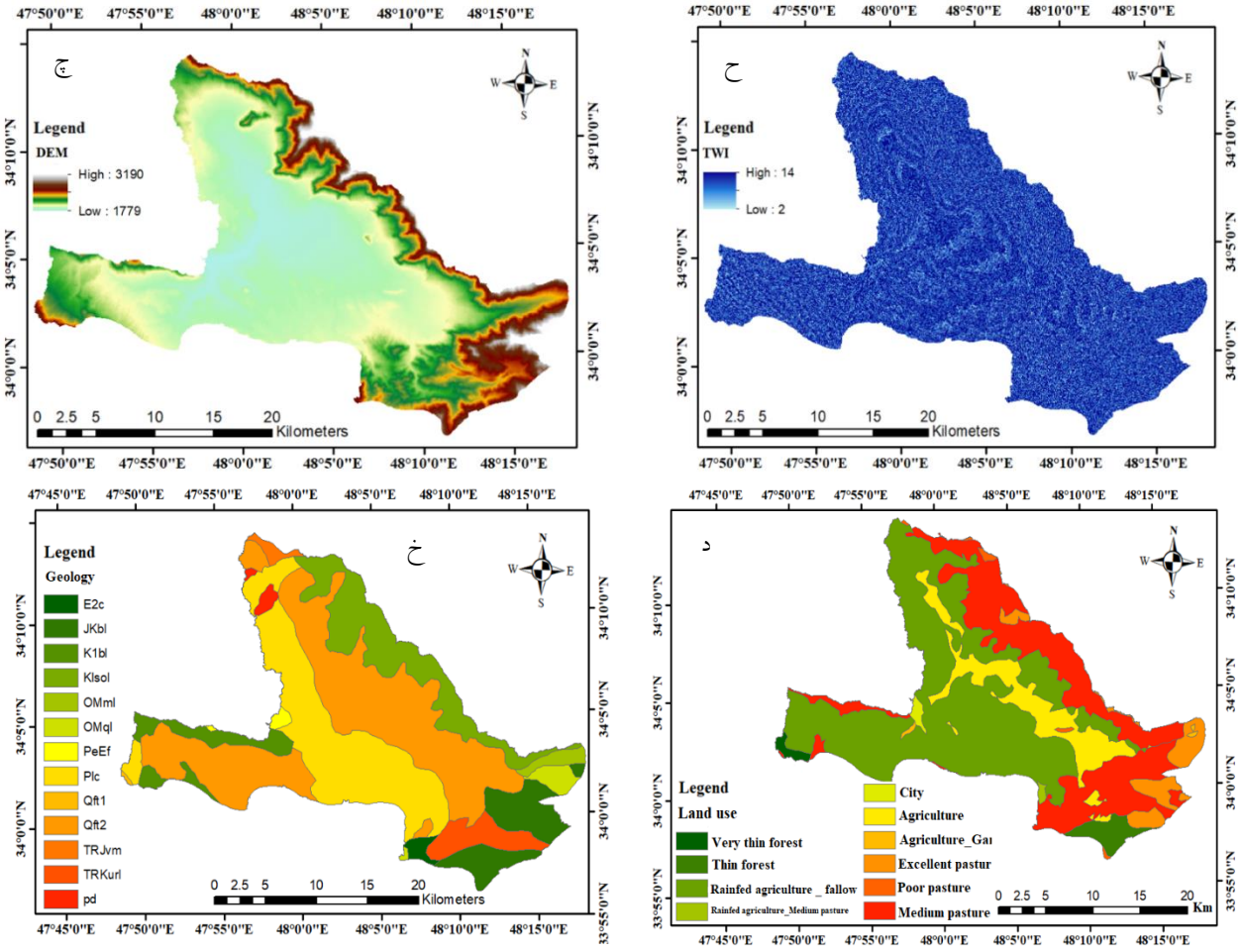
نتایج

پس از ورود نقاط حضور (Presence Points) برای آموزش مدل و تعیین متغیرهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی، الگوریتم حداکثر آنتروپی MaxEnt اجرا شد و نقشه پهنه‌بندی خطر آلودگی آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی تولید شد. در شکل ۳، نقشه‌های مربوط به پارامترهای مؤثر شامل شیب، جهت شیب، طول شیب، انحنای شیب، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، زمین‌شناسی، بافت خاک، پوشش گیاهی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و کاربری اراضی نمایش داده شده‌اند. این نقشه‌ها بیانگر ویژگی توزیع فضایی هر پارامتر در حوضه هستند که دارای اثر قابل‌توجهی در مدل‌سازی پتانسیل آلودگی هستند. برای مثال، تنوع سازندهای زمین‌شناسی در ارتفاعات شمال و غرب بیشتر است و رسوبات مخروط‌افکنه‌ای که بیشترین سطح حوضه را تشکیل می‌دهند.



[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]



شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر در تعیین مناطق دارای پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی الف: شیب، ب: جهت شیب، پ: طول شیب، ت: انحنای شیب، ث: فاصله از رودخانه، ج: فاصله از جاده، چ: ارتفاع، ح: شاخص رطوبت توپوگرافی ، **خ: زمین ششناسی، د: کاربری اراضی**

Fig 3 - Map of factors affecting the determination of areas with potential for groundwater contamination a: Slope, b: Aspect, c: Slope length, d: Slope curvature, e: Distance from river, f: Distance from road, g: Elevation, h: Topographic moisture index, i: Geology, j: Land use

پس از اجرای مدل در نرم‌افزار MaxEnt، درصد سهم نسبی متغیرها در مدل‌سازی به دست آمد که در جدول ۱ ارائه شده است. هرچه سهم یک متغیر بیشتر هست، تأثیر آن در مدل‌سازی نیز بیشتر خواهد بود. زمین‌شناسی با سهم ۳۶/۷ درصد به‌عنوان مؤثرترین عامل شناخته شد، در حالی که شاخص جهت شیب، انحنای شیب و ارتفاع کم‌ترین تأثیر را در مدل‌سازی داشتند. اهمیت بالای زمین‌شناسی ناشی از حضور دو واحد اصلی زمین‌شناسی منطقه است؛ ارتفاعات پوشیده از سازندهای آهکی، مارنی و ماسه‌سنگی که علاوه بر تأمین تغذیه آبخوان، به دلیل ساختار شکستگی‌ها متخلخل هستند و حساسیت به انتقال آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند، و دشت نورآباد با آبرفت‌های جوان و نفوذپذیر که محل تجمع و نفوذ آلاینده‌هاست. این ترکیب زمین‌شناسی دوگانه موجب تأثیرگذاری برآبخوان و آلودگی شده است.

شکل ٤ منحنی پاسخ برخی از پارامترهای مورد استفاده برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی و نحوه تأثیر آن‌ها در پیش‌بینی مدل MaxEnt را نشان می‌دهد. در این شکل، برخی شاخص‌های مورد استفاده مانند زمین‌شناسی، شیب، و ارتفاع ارائه شده است که برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. زمین‌شناسی که بیشترین سهم در مدل‌سازی را دارد، با توجه به منحنی پاسخ زمین‌شناسی سیر نزولی دارد که بیانگر کاهش احتمال آلودگی با افزایش تنوع سازندهای مقاوم‌تر در منطقه است. افزایش شیب و جهت شیب باعث افزایش احتمال وقوع آلودگی می‌شود. در شیب نزدیک به صفر (زمین کاملاً مسطح) احتمال وقوع آلودگی بسیار بالا است (بیش از ۰/۷) و با افزایش شیب تا حدود ۵—۱۰ درجه، احتمال آلودگی به سرعت کاهش می‌یابد؛ سپس در بازه تقریبی ۱۰ تا ۵۵ درجه این احتمال تقریباً ثابت و پایین باقی می‌ماند. در شیب‌های بسیار زیاد (نزدیک به ٦٠ درجه) نیز احتمال آلودگی به حداقل مقدار می‌رسد. با افزایش ارتفاع، احتمال وقوع آلودگی کاهش می‌یابد.

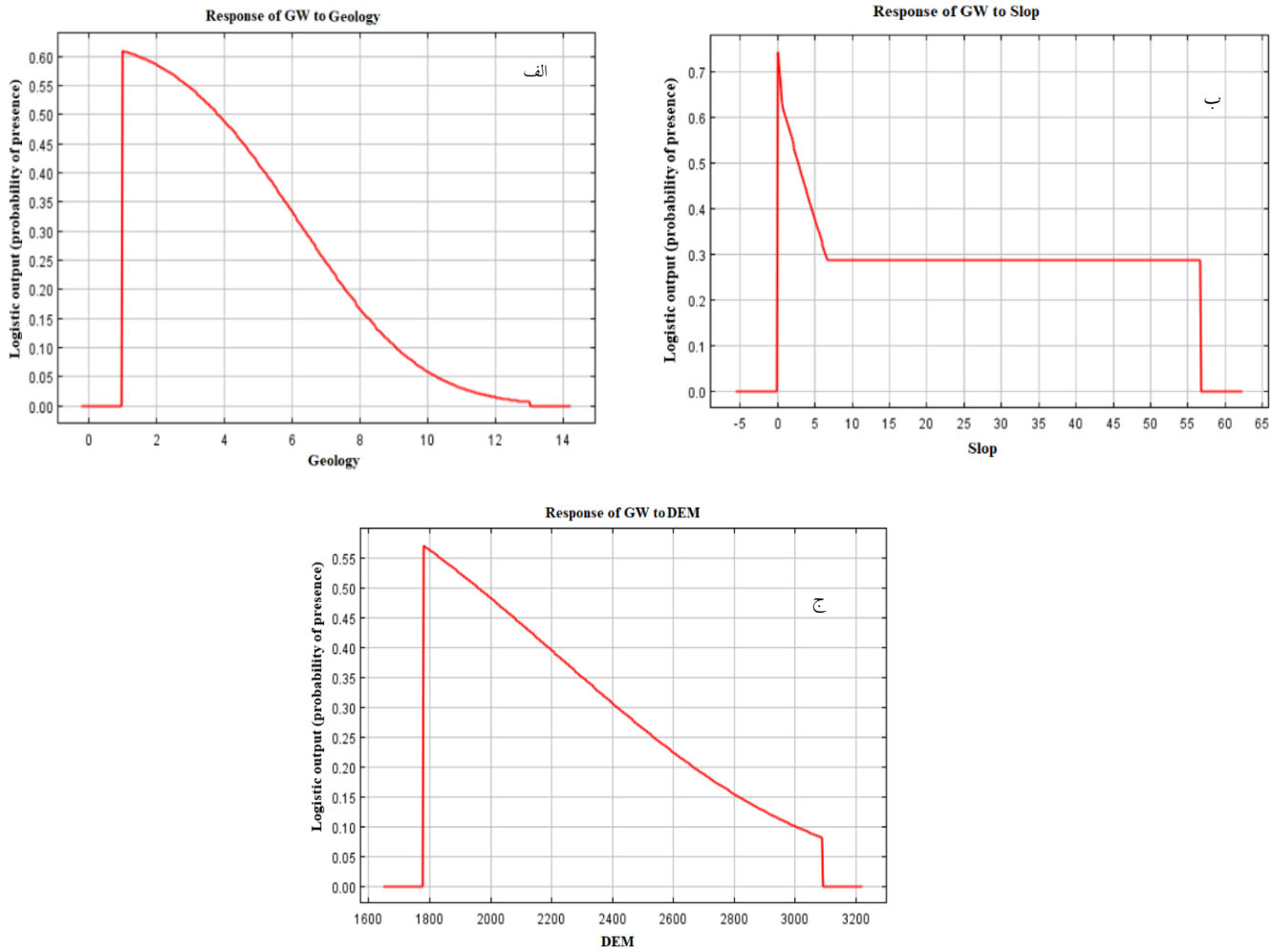
[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

جدول ۱- درصد سهم نسبی متغیرها در مدل‌سازی

Table 1- Percentage of relative contribution of variables in modeling

درصد سهم Percentage share	نام اختصاری Abbreviation name	متغیر Variable	درصد سهم Percentage share	نام اختصاری Abbreviation name	متغیر Variable
5.8	TWI	شاخص رطوبت توپوگرافی	36.7	Geology	زمین‌شناسی
1.6	Vgetation	پوشش گیاهی	17.7	Slop	شیب
1	Land use	کاربری اراضی	12.6	Distance_ Road	فاصله از جاده
0.2	Aspect	جهت شیب	9.4	Ls	طول شیب
0.1	Slope curvature	انحنای شیب	8.6	Soil texture	بافت خاک
0	Dem	ارتفاع	6.2	Distance_ River	فاصله از رودخانه



شکل ٤- منحنی پاسخ عامل‌های مؤثر در آلودگی آب زیرزمینی مورد استفاده در مدل MaxEnt الف:زمین شناسی، ب: شیب، ج: ارتفاع

Fig 4- Response curve of factors affecting groundwater pollution used in the MaxEnt model a: Geology, b: Slope, c: Elevation

آزمون جکنایف

آنالیز حساسیت مدل با استفاده از آزمون جکنایف انجام شد و نتایج آن به‌صورت نمودار در شکل ۵ ارائه شده است. آزمون جکنایف به‌عنوان شاخصی برای تعیین اهمیت عوامل مؤثر در وقوع پدیده مورد بررسی عمل می‌کند و نشان می‌دهد که از بین متغیرهای مستقل ورودی، کدام عوامل بیشترین و کدام کمترین تأثیر را دارند. این منحنی شامل سه حالت مختلف است: حالت اول (خطوط آبی کم‌رنگ) نشان‌دهنده تأثیر همهٔ ورودی‌ها بر پدیده مورد مطالعه است،

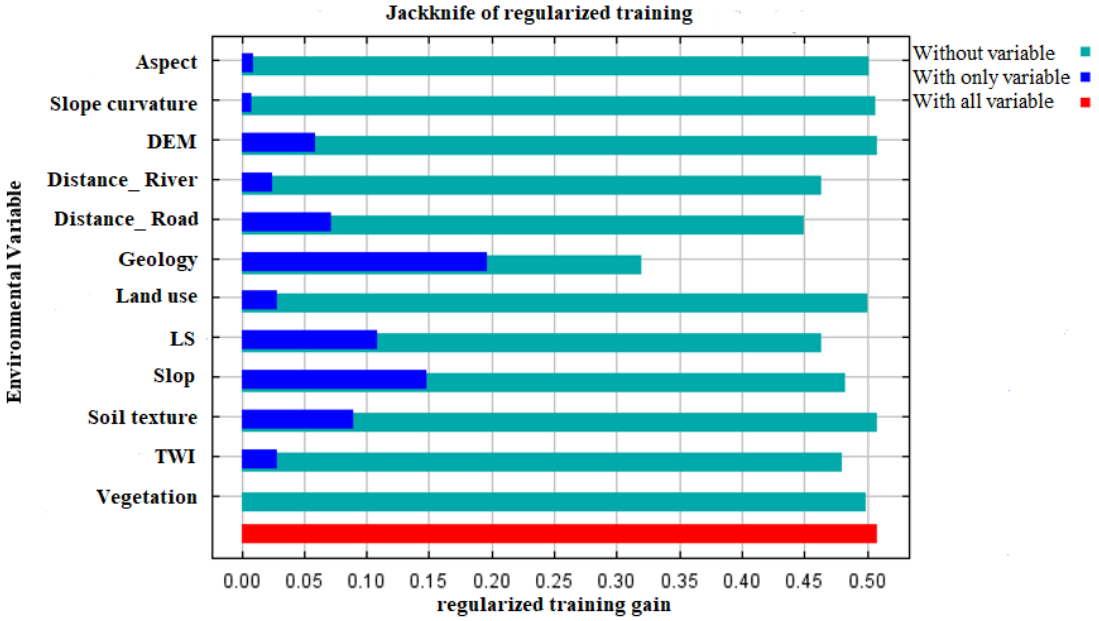
[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

بدون اینکه لایه خاصی مشخص شده باشد. حالت دوم (خطوط آبی پررنگ) نشان‌دهنده تأثیر یک متغیر یا لایه خاص است که در آن مدل‌سازی تنها بر اساس یک متغیر انجام می‌شود و برآورد میزان رخداد مورد بررسی بر این اساس انجام می‌گیرد. حالت آخر (خط قرمزرنگ) نشان‌دهنده تأثیر توأم همهٔ پارامترها یا لایه‌ها است. نتایج حاصل از آزمون جکنایف برای تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها در پیش‌بینی مدل در شکل ۵ نشان داده شده است.

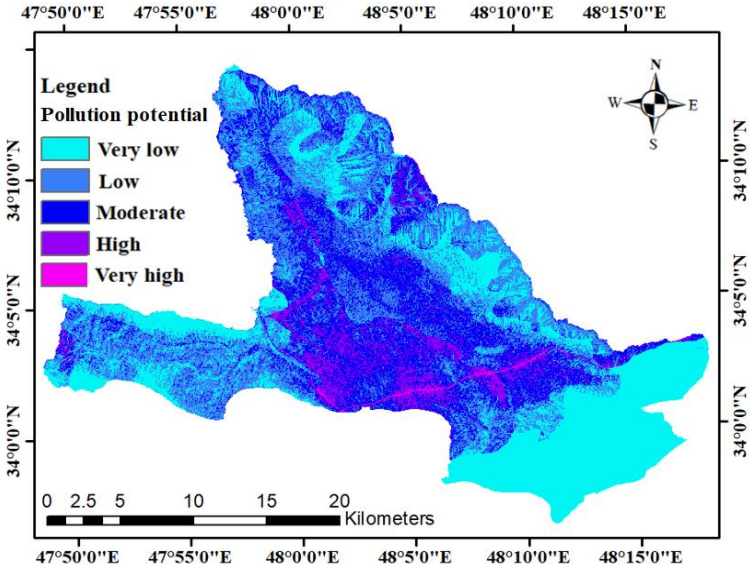
بر این اساس، زمین‌شناسی، شیب، طول شیب و خاک به عنوان مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر پیش‌بینی شناخته شده‌اند و مدل نسبت به این پارامترها حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. در مقابل، مدل نسبت به پارامترهای پوشش گیاهی، جهت شیب و انحنای شیب به ترتیب حساسیت کمتری دارد.

با در نظر گرفتن متغیرهای محیطی تأثیرگذار و استفاده از روش حداکثر آنتروپی، نقشه پتانسیل مناطق مستعد به آلودگی آب‌های زیرزمینی پس از طبقه‌بندی تهیه شد که در شکل ٦ قابل مشاهده است. بر اساس این نقشه، ۳۳/۷۵ درصد از مساحت منطقه دارای پتانسیل خیلی کم، ۳۲/۲۲ درصد دارای پتانسیل کم، ۲٦/۳۱ درصد



شکل ۵- نتایج حاصل از آزمون جکنایف برای بررسی اهمیت هرکدام از متغیرهای محیطی در مدل MaxEnt

Fig 5- Results of the Jackknife test to examine the importance of each environmental variable in the MaxEnt model

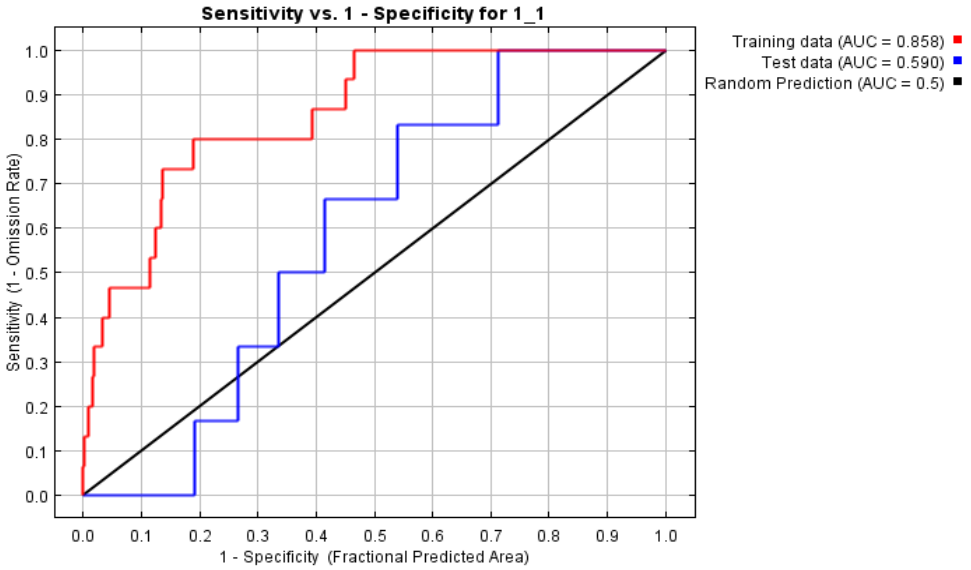


شکل ٦- نقشه پتانسیل سنجی آلودگی آب زیرزمینی حوضه بادآور

Fig 6 - Groundwater pollution potential map of Badavar basin

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]



شکل ۷- نتایج حاصل از اعتبارسنجی

Fig7 - Validation results

دارای پتانسیل متوسط، ۷/۳۱ درصد دارای پتانسیل زیاد و ۰/۳۳ درصد دارای پتانسیل خیلی زیاد کیفیت نامناسب آب زیرزمینی هستند. جنوب دشت بالاترین پتانسیل وقوع آلودگی آب زیرزمینی را دارد. این مناطق با تجمع جمعیت، توسعه جاده‌ها و پوشش آبرفتی نفوذپذیر تطابق دارد، درحالی‌که ارتفاعات با شیب زیاد، ریسک کمتری دارند. ارتفاعات شمالی به دلیل شیب زیاد و شرایط نفوذی کمتر، در کلاس‌های خطر پایین‌تر جای گرفته‌اند.

اعتبارسنجی مدل

نتایج حاصل از اعتبارسنجی نیز در شکل ۷ نمایش داده می‌شود. این منحنی شامل نمودارهایی است که روی محور x ، معیار معینی برای پارامتر مورد بررسی قرار دارد و روی محور y ، میزان احتمال پیش‌بینی شده توسط خروجی منطقی را نشان می‌دهد. روند رو به بالا در منحنی نشان‌دهنده رابطه مثبت و حرکت رو به پایین نشان‌دهنده رابطه منفی است. این نمودار در واقع میزان رابطه پارامتر با احتمال مورد بررسی را مشخص می‌کند. مقدار سطح زیر منحنی AUC برای نمونه‌های آموزشی ۰/۸۵ و برای نمونه‌های آزمایشی ۰/۵۹ است، که نشان‌دهنده سطح قابل قبول نتایج است.

مقدار بالای AUC در دسته آموزشی نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در تشخیص مناطق مستعد است. کاهش اعتبار در نمونه‌های آزمایشی نیز ناشی از تعداد کم نقاط حضور یا برخی عدم یکنواختی‌های فضایی است.

بحث و نتیجه‌گیری

منابع آب زیرزمینی به دلیل اطمینان‌پذیری بالاتر و نوسانات کمتر، از دیرباز به‌عنوان گزینه‌ای مطمئن مورد استفاده انسان قرار گرفته‌اند، اما در دهه‌های اخیر به دلیل برداشت بیش از حد تغذیه، با کاهش کمی و کیفی مواجه شده‌اند. روش‌های سنتی و دستی که برای شناخت پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند، معمولاً نیازمند صرف زمان، هزینه و نیروی انسانی زیادی هستند و به دلیل نبود اطلاعات رقومی، امکان ایجاد بانک اطلاعاتی به‌روزرسانی‌پذیر وجود ندارد. در این راستا، مدل MaxEnt می‌تواند به‌عنوان یک روش سریع و مدرن مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه با هدف شناسایی مناطق مستعد آلودگی آب زیرزمینی در حوضه بادآور با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی MaxEnt انجام شد. نتایج نشان داد که زمین‌شناسی با سهم ۳۶/۷ درصد، مؤثرترین عامل در مدل‌سازی آلودگی آب زیرزمینی در این منطقه است. این یافته نشان می‌دهد که سازندهای زمین‌شناسی نقش مهمی در کنترل نفوذ و حرکت آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی دارند. تحقیقات مشابه نشان داده‌اند که لایه‌های رسی و شیل به دلیل نفوذپذیری پایین، به عنوان موانع طبیعی عمل می‌کنند و از ورود آلاینده‌ها به آب زیرزمینی جلوگیری می‌کنند. در مقابل، وجود شکستگی‌ها یا لایه‌های سنگی با نفوذپذیری بالا می‌تواند مسیرهایی برای انتقال سریع آلاینده‌ها فراهم کند. برای مثال، تحقیقاتی در سایت دفن زباله در آفریقای جنوبی نشان داده است که شکستگی‌های موجود در بستر سنگی می‌توانند مسیرهای مطلوبی برای حرکت آلاینده‌ها ایجاد کنند، حتی اگر لایه‌های بالایی خطر کمتری برای آلودگی داشته باشند. این یافته توسط سیمپایدا و همکاران [۲۶] تأیید شده است. این پدیده نشان می‌دهد که وجود شکستگی‌ها در سنگ‌های زیرزمینی می‌تواند به‌عنوان یک مسیر انتقال سریع آلاینده‌ها عمل کند حتی در شرایطی که لایه‌های بالایی از نفوذپذیری کمتری برخوردار باشند. همچنین در یک مطالعه دیگر در منطقه Tirunelveli هند، مشخص شد که ساختارهای زمین‌شناسی

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

مانند دایک‌ها و شکستگی‌ها می‌توانند هم به‌عنوان موانع طبیعی و هم به‌عنوان مسیرهای انتقال آب زیرزمینی عمل کنند. این ساختارها تأثیر مستقیمی بر کیفیت آب زیرزمینی دارند، زیرا می‌توانند باعث تجمع یا پراکندگی آلاینده‌ها شوند. این یافته توسط سنتیل‌کومار و همکاران [۳۸] تأیید شده است. این پدیده نشان می‌دهد که وجود دایک‌ها و شکستگی‌ها در سنگ‌های زیرزمینی به‌عنوان یک عامل مهم در کنترل حرکت و توزیع آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی است.

شرایط اقلیمی منطقه نورآباد که بر اساس روش دومارتن مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب طبقه‌بندی شده، با میانگین بارش سالانه حدود ۵۳۸ میلی‌متر، نقش مهمی در تغذیه و پویایی آبخوان دارد. بااین‌حال، در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی مانند کاهش بارش‌های مؤثر، افزایش دما و شدت تبخیر، موجب کاهش توان تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی و افزایش تمرکز آلاینده‌ها شده‌اند. از سوی دیگر، عوامل انسانی نظیر برداشت بی‌رویه از چاه‌ها، توسعه کشاورزی بدون کنترل کاربری اراضی و تخلیه مستقیم فاضلاب‌های شهری و پساب‌های کشاورزی به رودخانه بادآور، به‌عنوان محرک‌های اصلی آلودگی شناخته می‌شوند. این عوامل در کنار ویژگی‌های طبیعی منطقه مانند نفوذپذیری بالای آبرفت‌ها و تبادل مستقیم آب سطحی و زیرزمینی، موجب افزایش حساسیت آبخوان به ورود آلاینده‌ها شده‌اند؛ بنابراین، در تحلیل نهایی مدل، توجه به این مؤلفه‌های اقلیمی، انسانی و طبیعی برای تبیین دقیق‌تر نتایج ضروری است.

به‌طورکلی، ترکیب ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی نقش کلیدی در کنترل آلودگی آب زیرزمینی ایفا می‌کند. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی از طریق ارزیابی دقیق و جامع ویژگی‌های زمین‌شناسی تأکید می‌کنند. همچنین، عوامل مانند شیب، طول شیب و نوع خاک از دیگر پارامترهای مهم و مؤثر در پیش‌بینی آلودگی آب زیرزمینی هستند. افزایش شیب و طول شیب می‌تواند به دلیل افزایش رواناب سطحی و انتقال آلاینده‌ها، احتمال آلودگی را افزایش دهد. نوع خاک نیز با تأثیرگذاری بر نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آلاینده‌ها، نقش مهمی در آلودگی آب زیرزمینی ایفا می‌کند. شیب بیشتر با کاهش نفوذپذیری خاک، رواناب سطحی را افزایش داده و انتقال آلاینده‌ها به سفره‌های زیرزمینی را تسریع می‌کند. این پدیده نشان می‌دهد که افزایش شیب زمین می‌تواند به‌عنوان یک عامل مهم در تسریع انتقال آلاینده‌ها به منابع آب زیرزمینی عمل کند. این یافته با مطالعاتی مانند هوانگ و همکاران [۲۰] و ژانگ و همکاران [۴۱] هم‌راستا است؛ آن‌ها نیز زمین‌شناسی و شیب را به‌عنوان عوامل کلیدی در انتقال آلاینده‌ها معرفی کردند. به‌ویژه هوانگ در مرور ۲۹۹ مقاله نشان داد که MaxEnt در شرایط داده‌های محدود، عملکرد قابل‌قبولی دارد و متغیرهایی مانند شیب، خاک و فاصله از منابع آلاینده نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. از سوی دیگر، عوامل مانند جهت شیب، انحنای شیب و پوشش گیاهی، حساسیت کمتری در مدل‌سازی نشان دادند. این پدیده ناشی از تأثیر غیرمستقیم این عوامل بر آلودگی آب زیرزمینی یا محدودیت‌های مدل در تشخیص دقیق تأثیر آن‌ها است. برخی مطالعات مانند کریشنامورتی و لاکشمانان[۲۴] نشان دادند که پوشش گیاهی و جهت شیب تأثیر بیشتری در مدل‌سازی دارند؛ در حالی که در پژوهش حاضر، این دو پارامتر کم‌ترین سهم را در مدل‌سازی داشتند. این تفاوت ناشی از تفاوت‌های اقلیمی، نوع داده‌های ورودی یا ساختار زمین‌شناسی منطقه هست. همچنین، در مطالعه چن و همکاران [۹] در چین، تنوع سازندهای زمین‌شناسی به‌عنوان عامل کاهنده آلودگی معرفی شد که با منحنی پاسخ زمین‌شناسی در این پژوهش هم‌راستا است؛ زیرا با افزایش تنوع سازندها، احتمال آلودگی کاهش یافت.

نقشه پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی که با استفاده از مدل MaxEntتهیه شده است، نشان می‌دهد که حدود ۳۱/۲۶ درصد از مساحت منطقه دارای پتانسیل متوسط آلودگی و حدود هشت درصد دارای پتانسیل بالا یا بسیار بالا هستند. به طور خاص، جنوب دشت بادآور به‌عنوان منطقه‌ای با بالاترین پتانسیل آلودگی شناسایی شده است. این یافته احتمالاً به دلیل ترکیب ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و کاربری اراضی در این منطقه هست. نتایج اعتبارسنجی مدل MaxEnt با به‌کارگیری آزمون جکنایف و محاسبه شاخص سطح زیر منحنی (AUC) حاکی از توانایی قابل‌توجه این مدل در پیش‌بینی نواحی مستعد آلودگی آب زیرزمینی حوضه بادآور است.

در مقایسه با مطالعات مشابه، پژوهش رزندی و همکاران [۳۵]. در دشت همدان بهار، مقدار AUC معادل ۰/۸۴ گزارش کرده‌اند در مطالعه اقتدارنژاد و همکاران [۱۲]. مقدار AUC برای داده‌های آموزشی ۰/۸۵ و برای داده‌های آزمایشی ۰/۷۶ برای پتانسیل‌سنجی مستعد به خشکسالی هیدرولوژیک منابع آب زیرزمینی در دشت جیرفت به دست آمده است. همچنین جعفرزاده و همکاران [۲۲] در مطالعه خود میزان AUC برابر با ۰/۸۶ به دست آوردند. تیموری و اسدی نلیوان نیز مقدار AUC برای داده‌های آموزشی ۰/۹۱ و برای داده‌های آزمایشی ۰/۸۰ به‌منظور تعیین پتانسیل آب زیرزمینی منطقه تربت‌جام گزارش نمودند. در پژوهش حاضر، مقدار AUC برای داده‌های آموزشی ۰/۸۵ و برای داده‌های آزمایشی ۰/۵۹ بوده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل MaxEnt در این مطالعه عملکردی قابل‌قبول و هم‌راستا با مطالعات پیشین داشته است.

این یافته‌ها با نتایج سایر مطالعات مشابه از جمله پژوهش‌های یو و همکاران [۳۲]، یانگ و همکاران [۴۰]، رحمتی و همکاران [۳۴] و گلکریان و رحمتی [۱۶] همخوانی دارد. تفاوت مقادیرAUC بین داده‌های آموزشی و آزمایشی احتمالاً ناشی از محدودیت‌های موجود در نمونه‌برداری یا نیاز به بهبود پارامترهای مدل هست، بااین‌حال همچنان نشان‌دهنده قابلیت کاربردی مدل در ارزیابی‌های محیطی است. نتایج این پژوهش اثربخشی مدلMaxEnt را به‌عنوان روشی مؤثر در شناسایی مناطق در معرض خطر آلودگی آب زیرزمینی و مدیریت هدفمند منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید می‌کند. بااین‌حال از منظر مدیریتی، پیشنهاد می‌شود در جنوب دشت بادآور که دارای بیشترین پتانسیل آلودگی است،

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

اولویت‌بندی چاه‌های پایش انجام گیرد. همچنین، اقدامات اصلاحی مانند محدودسازی برداشت، کنترل کاربری اراضی، و استفاده از پوشش گیاهی مقاوم به آلودگی در کاهش ریسک مؤثر است.

همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تحلیل عمیق‌تری از تعامل عوامل محیطی (مانند هیدروژئوشیمی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی) با پدیده آلودگی انجام شود. استفاده از داده‌های دقیق‌تر و جامع‌تر (مانند نمونه‌برداری میدانی با تراکم بالاتر و سنجش‌های بلندمدت) نیز می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های مدل را بهبود بخشد و امکان تدوین راهبردهای مدیریتی پایدارتر را فراهم کند. این رویکرد به‌ویژه در مناطقی با تنش آبی شدید، از اولویت بالایی برخوردار است.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت دانشگاه لرستان قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

علی حقی‌زاده: راهنمایی، بازبینی، مفهوم‌سازی، نظارت علمی، تحلیل‌های نرم‌افزاری/ آماری تأیید نسخه نهایی.

زینب حاجی‌زاده: جمع‌آوری داده، مدل‌سازی، نگارش مقاله، ویرایش و بازبینی مقاله، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/ آماری.

لیلا قاسمی: جمع‌آوری داده، ویرایش، مفهوم‌سازی

منابع مورد استفاده

1. Agrawal, D., Singh, J.K. and Kumar, A., 2005. Maximum entropy-based conditional probability distribution runoff model. *Biosystems Engineering*, *90*(1), pp.103-113. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.08.003

2. Ai, L., Shi, Z.H., Yin, W. and Huang, X., 2015. Spatial and seasonal patterns in stream water contamination across mountainous watersheds: Linkage with landscape characteristics. *Journal of Hydrology*, *523*, pp.398-408. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.082

3. Alishiri, H., Sajadifar, S.H. and Mohammadbagheri, A., 2017. Validity of the environmental Kuznets curve hypotheses in water pollution a case study. (inPersian). http://www.wwjournal.ir/article_39474.html

4. Alnahit, A.O., Mishra, A.K. and Khan, A.A., 2020. Quantifying climate, streamflow, and watershed control on water quality across Southeastern US watersheds. *Science of The Total Environment*, *739*, p.139945. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139945

5. Asadi Nalivan, A. 2017. Evaluation and mapping of groundwater resources and uses in order to present a management plan for the Hableh-Rod River Basin, PhD thesis in Watershed Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian).

6. Atashi Yazdi, S.S., Motamedvaziri, B., Hosseini, S.Z. and Ahmadi, H., 2023. Reciprocal analysis of groundwater potentiality and vulnerability modeling in the Bahabad Plain, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(14), pp.39586-39604. DOI:10.21203/rs.3.rs-1793110/v1

7. Banavar, J.R., Maritan, A. and Volkov, I., 2010. Applications of the principle of maximum entropy: from physics to ecology. *Journal of Physics: Condensed Matter*, *22*(6), p.063101. DOI 10.1088/0953-8984/22/6/063101

8. Bawa, R. and Dwivedi, P., 2019. Impact of land cover on groundwater quality in the Upper Floridan Aquifer in Florida, United States. *Environmental pollution*, *252*, pp.1828-1840. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.054.

9. Chen, X., Santos, I.R., Du, J., Xu, B., Tamborski, J.J., He, D., Cukrov, N., Sanders, C.J., Liu, J., Zhu, P. and Zhang, Y., 2025. Sandy Subterranean estuaries minimize groundwater nitrogen pollution impacts on coastal waters. *Geophysical research letters*, *52*(3), p.e2024GL109621. https://doi.org/10.1029/2024GL109621

10. Dean, K. and Mitchell, J., 2022. Identifying water quality and environmental factors that influence indicator and pathogen decay in natural surface waters. *Water Research*, *211*, p.118051. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118051

11. Deng, F., Deng, Z., Lv, D., Wang, D., Duan, H. and Xing, Z., 2016. Application of remote sensing and GIS analysis in groundwater potential estimation in west Liaoning Province, China. *Journal of Engineering Research*, *4*(3).

12. Eghtedarnejad, M., Maleki-nejad, H., Rafiei-Sardoui, R. 2024. Investigating the Effectiveness of the Maximum Entropy Model in Measuring the Potential of Areas Prone to Hydrological Drought of groundwater Resources (case study: Jiroft Plain). Journal of Ecohydrology, Volume 11, No. 1. pp. 105-124. (In Persian).

13. Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, *17*(1), pp.43-57.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

Technology & Innovation, *17*, p.100532. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100532

24. Krishnamoorthy, L. and Lakshmanan, V.R., 2024. Groundwater quality assessment using machine learning models: a comprehensive study on the industrial corridor of a semi-arid region. *Environmental Science and Pollution Research*, pp.1-24. DOI:10.1007/s11356-024-34119-7

25. Lu, Y., Song, S., Wang, R., Liu, Z., Meng, J., Sweetman, A.J., Jenkins, A., Ferrier, R.C., Li, H., Luo, W. and Wang, T., 2015. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environment international*, *77*, pp.5-15. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.12.010

26. Mepaiyeda, S., Madi, K., Gwavava, O. and Baiyegunhi, C., 2020. Geological and geophysical assessment of groundwater contamination at the Roundhill landfill site, Berlin, Eastern Cape, South Africa. *Heliyon*, *6*(7). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04249

27. Mirzapour, H., Hagizadeh, A., Tahmasebipour, N., Zeinivand, H. 2019. Predicting land use changes using the Markov-autonomous cell model in the Badavar watershed of Lorestan. Hydrogeomorphology, No. 20, Year 5, pp. 79-99. (In Persian).

28. Morales, N.S., Fernández, I.C. and Baca-González, V., 2017. MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? A systematic review. *PeerJ*, *5*, p.e3093. doi.org/ 10.7717/peerj.3093

29. Nakhaei, M. and Vadiati, M., 2012. Application of fuzzy inference model to evaluation of qanat water quality for drinking and agricultural purposes (case study: Tehran province). *Advanced Applied Geology*, *2*(4), pp.44-52. (In Persian).

30. Nguyen, T.H.T., Boets, P., Lock, K., Ambarita, M.N.D., Forio, M.A.E., Sasha, P., Dominguez-Granda, L.E., Hoang, T.H.T., Everaert, G. and Goethals, P.L., 2015. Habitat suitability of the invasive water hyacinth and its relation to water quality and macroinvertebrate diversity in a tropical reservoir. *Limnologica*, *52*, pp.67-74. https://doi.org/10.1016/j.limno.2015.03.006

31. Oliaei, A., Parvian, N., & Khosravi, A. (2017). Investigating the potential of groundwater resources in hard formations as a way to manage water crisis (case study: Kalat Naderi Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *6*(4), 143-158. (In Persian). DOI: 10.22067/geov6i4.60380

32. Pei-Yue, L., Hui, Q. and Jian-Hua, W., 2011. Application of Set Pair Analysis Method Based on Entropy Weight in Groundwater Quality Assessment-A Case Study in Dongsheng City, Northwest China. *Journal of chemistry*, *8*(2), pp.851-858. https://doi.https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x

14. Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, *27*(8), pp.861-874. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010

15. Giao, N.T., Nhien, H.T.H., Anh, P.K. and Thuptimdang, P., 2023. Groundwater quality assessment for drinking purposes: a case study in the Mekong Delta, Vietnam. *Scientific Reports*, *13*(1), p.4380.

16. Golkarian, A. and Rahmati, O. 2018. Use of a maximum entropy model to identify the key factors that influence groundwater availability on the Gonabad Plain, Iran. Environmental earth sciences, 77(10): 1–20. https://doi.org/10.1007/s12665-018-7551-y

17. Golshan, M., Dastoorpour, M. and Birgani, Y.T., 2020. Fuzzy environmental monitoring for the quality assessment: Detailed feasibility study for the Karun River basin, Iran. *Groundwater for sustainable development*, *10*, p.100324. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100324

18. Gómez, V.M.R., Gutiérrez, M., Haro, B.N., López, D.N. and Herrera, M.T.A., 2017. Groundwater quality impacted by land use/land cover change in a semiarid region of Mexico. *Groundwater for Sustainable Development*, *5*, pp.160-167. https://doi.org/ 10.1016/j.gsd.2017.06.003.

19. Hasanvand, N. and Forghani Tehrani, G., 2019. Geochemical study of water and sediments in the Badavar River, Lorestan Province: environmental iImplications. *Journal of stratigraphy and sedimentology researches*, *35*(4), pp.105-128. (In Persian). doi.org/10.22108/jssr.2019.118373.1112

20. Huang, Y., Wang, C., Wang, Y., Lyu, G., Lin, S., Liu, W., Niu, H. and Hu, Q., 2024. Application of machine learning models in groundwater quality assessment and prediction: progress and challenges. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *18*(3), p.29. DOI:10.1007/s11783-024-1789-2

21. Ip, W.C., Hu, B.Q., Wong, H. and Xia, J., 2009. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China. *Journal of Hydrology*, *379*(3-4), pp.284-290. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.013

22. Jaafarzadeh, M.S., Moghaddamnia, A., Joodavi, A. and Ahmadi, A., 2025. Assessment of the quality of Salmas aquifer and mapping of areas with pollution potential. *Journal Of Iranian Water Engineering Research*, *2*(4), pp.35-56. (In Persian).

https://doi.org/10.22034/ijwer.2024.482845.1056

23. Jahin, H.S., Abuzaid, A.S. and Abdellatif, A.D., 2020. Using multivariate analysis to develop irrigation water quality index for surface water in Kafr El-Sheikh Governorate, Egypt. *Environmental*

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]

org/10.1155/2011/879683

33. Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, *190*(3-4), pp.231-259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

34. Rahmati, O. Pourghasemi, H.R. and Melesse, A.M. 2016. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. Catena, 137, 360-372. (In Persian). https://doi. org/10.1016/j.catena.2015.10.010

35. Razandi, Y., Farrokhzadeh, B., Yousefzadeh Chabak, M., Teymurian, T. 2017. Potential assessment of groundwater resources using maximum entropy algorithm and geographic information system (case study: Hamedan-Bahar plain). Quarterly Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering. Volume 8, No. 29, pp. 110-123. (In Persian).

36. Riseng, C.M., Wiley, M.J., Black, R.W. and Munn, M.D., 2011. Impacts of agricultural land use on biological integrity: a causal analysis. *Ecological Applications*, *21*(8), pp.3128-3146. https://doi.org/10.1890/11-0077.1

37. Rutledge, J.M. and Chow-Fraser, P., 2019. Landscape characteristics driving spatial variation in total phosphorus and sediment loading from sub-watersheds of the Nottawasaga River, Ontario. *Journal of environmental management*, *234*, pp.357-366. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.114

38. Senthilkumar, M., Arumugam, R., Gnanasundar, D., C Thambi, D.S. and Kumar, E.S., 2015. Effects of geological structures on groundwater flow and quality in hardrock regions of northern Tirunelveli district, southern India. *Journal of Earth System Science*, *124*(2), pp.405-418. DOI:10.1007/s12040-015-0538-0

39. Wu, J. and Lu, J., 2021. Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes. *Water Research*, *191*, p.116811. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116811

40. Yang, X.Q., Kushwaha, S.P., Saran, S., Xu, J. and Roy, P.S., 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, Justicia adhatoda L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological engineering*, *51*, pp.83-87. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.004

41. Zhang, C., Qiao, X., Chai, X. and Yu, W., 2025. Simulation and Prediction of Soil–Groundwater Pollution: Current Status and Challenges. *Water*, *17*(17), p.2500. https://doi.org/10.3390/w17172500

42. Zhang, W., Chang, W.J., Zhu, Z.C. and Hui, Z., 2020. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. *Applied Geography*, *117*, p.102174. doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102174.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

[DOI: 10.22034.19.71.2]