نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران

Iran-Watershed Management Science & Engineering

Vol. 19, No. 69, Summer 2025

سال نوزدهم- شماره ۶۹- تابستان ۱۴۰۴

Evaluation of the Stability of the Maximum Entropy Algorithm for Modeling the Potential of Groundwater Springs in the Farahroud watershed, Tehran province

Narges Javidan*[1], Ataollah Kavian[2]

Received: 12-11-2024, Revised 06-12-2024, Accepted: 10-05-2025, Published 29-07-2025

https://doi.org/10.22034/19.69.2

Extended Abstract

Introduction

A better understanding and assessment of groundwater resources are key principles in water resource management. Identifying areas susceptible to groundwater extraction can provide more water of better quality and reduce the costs associated with drilling and extracting groundwater. There are various methods for determining groundwater potential; however, it is noteworthy that the existing methods, despite their high accuracy, require significant skill, time, and expense. Therefore, utilizing new spatial modeling algorithms that incorporate environmental parameters (such as precipitation and lithology) and geographic information systems to determine groundwater potential represents a significant advancement in the field of groundwater resource management. The objective of this study is to evaluate the stability of a machine learning algorithm used to generate a groundwater spring potential map in the Farahroud watershed, Tehran Province. In this region, the increasing socio-economic problems due to drought and the depletion of water resources have heightened the need for greater attention to underground water resources. The Maximum Entropy Model (MaxEnt) is one of the advanced data mining models that has been employed in various research studies due to its advantages and capabilities. Accordingly, this advanced and well-regarded model was chosen as the benchmark and basis for its ability to predict sensitivity.

Methodology

After conducting spatial modeling, a groundwater potential prediction map was generated. In all three model runs, the accuracy of the model was calculated to be above 87% during the training phase. In the validation phase, accuracy ratios exceeding 79% were achieved. These results indicate very good performance in the training phase and good performance in the validation phase. The results, based on the area under the receiver operating characteristic (ROC) curve, demonstrated that the model performed with greater accuracy (95.0% in the training stage and 92.0% in the validation stage) when modeled with an 80:20 ratio. The superior accuracy and stability of the model with a training-to-validation ratio of 80/20 can be attributed to the increased learning capacity facilitated by a larger training set, better generalization to unused data, and reduced variability in model performance.

1. Narges javidan: Ph.D. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Iran. Corresponding Author: Narges.javidan20@gmail.com.

2. Ataollah Kavian: Professor, Department of Watershed Management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Address: Sari, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Faculty of Natural Resources, Watershed Management Department, Sari, Iran.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

These factors collectively contribute to a more reliable and effective modeling approach for predicting groundwater spring potential in the Farahroud watershed. Furthermore, based on the results obtained with this ratio, the model demonstrated higher stability. According to the groundwater spring potential map, approximately 16.78% and 6.29% of the area were classified as high and very high potential zones, respectively. Additionally, based on the Jackknife test, the topographic moisture index, drainage density, and distance from faults were identified as the most significant predictive factors for groundwater spring occurrence in the study area.

Results and Discussion

After performing spatial modeling, a groundwater potential prediction map was prepared. In all three model runs, the accuracy of the model was calculated to be above 87% in the training phase. In the validation phase, accuracy ratios above 79% were obtained. These results indicate very good and good performance in the training and validation phases, respectively. The results, based on the area under the receiver operating characteristic (ROC) curve, showed that the model performed with higher accuracy (95.0% in the training stage and 92.0% in the validation stage) when modeled with an 80:20 ratio. The superior accuracy and stability of the model for a training to validation ratio of 80/20 can be attributed to the increased learning capacity facilitated by a larger training set, better generalization to unused data, and reduced variability in model performance. These factors collectively contribute to a more reliable and effective modeling approach for predicting groundwater spring potential in the Farahroud watershed. Furthermore, based on the results obtained with this ratio, the model demonstrated higher stability. According to the groundwater spring potential map, approximately 16.78% and 6.29% of the area were classified as high and very high potential zones, respectively. Additionally, based on the Jackknife test, the topographic moisture index, drainage density, and distance from faults were identified as the most significant predictive factors for groundwater spring occurrence in the study area.

Conclusion

The evaluation of the MaxEnt model's accuracy and stability indicated that the model maintains high predictive power across different scenarios and exhibits robustness to changes in input data. This robustness is critical for practical applications, as it demonstrates that the model can reliably inform water management strategies even under fluctuating environmental conditions. By utilizing a diverse set of input parameters, including geological composition, topographic features, and climatic factors, we demonstrated that the MaxEnt model captures the complex relationships governing the occurrence of groundwater. This research not only identifies the interplay between key environmental factors and spring events but also provides a framework for future studies to further refine these models. We hope that our findings will stimulate additional research on the use of advanced algorithms in hydrological modeling and contribute to more informed decision-making processes regarding water conservation and management practices. Extending this research beyond the Farahroud watershed will enhance the understanding of groundwater resources in different geological and climatic regions and underscore the broad benefits of utilizing the maximum entropy algorithm in hydrology.

Keywords: *ROC, Geographic information system, Maximum Entropy model, Sample ratio, Stability*

Article Type: Research Article

Acknowledgement:

We gratefully acknowledge the Iranian Water Resources Research Organization (IWRO) and the Tehran Province Natural Resources and Watershed Management Department for their valuable cooperation and for providing essential data and facilities. We also extend our sincere appreciation to the journal's editors and anonymous reviewers for their constructive feedback, which significantly improved the quality of this article.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

Conflicts of interest:

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author

Authors' contribution:

All authors reviewed and approved the final manuscript. Individual contributions were as follows: Narges Javidan: Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Investigation, Software, Writing - original draft, Writing - review & editing. Dr. Atala Kavian :Supervision, Validation, Project administration, Writing - review & editing.

Citation: Javidan N, Kavian A. Evaluation of the Stability of the Maximum Entropy Algorithm for Modeling the Potential of Groundwater Springs in the Farahroud watershed, Tehran province. jwmseir 2025; 19 (69): 23-37

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 69, PP 23-37

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

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

ارزیابی پایداری الگوریتم بیشینه بی‌نظمی برای مدل‌سازی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی در آبخیز فرح رود، استان تهران

نرگس جاویدان*[1]،عطااله کاویان[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲، تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲، تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

https://doi.org/10.22034/19.69.2

چکیده

شناخت بهتر و اصولی منابع آب زیرزمینی یک اصل اساسی و کلیدی مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. هدف از مطالعه حاضر ارزیابی میزان پایداری الگوریتم یادگیری ماشین است که برای تولید نقشه پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی در آبخیز فرح‌رود، استان تهران مورداستفاده قرار گرفته است. مدل بیشینه بی‌نظمی یکی از مدل‌های پیشرفته داده‌کاوی است که به دلیل مزایا و قابلیت‌های آن در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. از این‌رو، این مدل پیشرفته و معروف به دلیل توانمند بودن در پیش‌بینی حساست‌پذیری به‌عنوان معیار و مبنا انتخاب شد. پس از شناسایی موقعیت چشمه‌ها (۴۹۵چشمه) برای یافتن بهترین اندازه نمونه و ارزیابی پایداری مدل، نمونه‌ها با سه اندازه نمونه ۵۰/۵۰، ۳۰/۷۰ و ۲۰/۸۰ درصد برای آموزش و اعتبارسنجی مدل با استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی تصادفی تقسیم شد. سپس عوامل زمین- محیطی اثرگذار در وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی به‌عنوان عوامل پیش‌بینی کننده از پایگاه داده مکانی تهیه شد. پس از انجام مدل‌سازی مکانی، نقشه پیش‌بینی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی تهیه شد. در هر ۳ بار اجرای مدل دقت مدل بالای ۸۷ درصد و ۷۹ درصد به ترتیب در مرحله آموزش و مرحله اعتبارسنجی برای هر سه نسبت دقت براساس منحنی ROCبه دست آمد. نتایج نشان داد زمانی که مدل‌سازی با نسبت ۸۰ به ۲۰ درصد انجام شد دقت بالاتری (۰/۹۵ در مرحله آموزش و ۰/۹۲ در مرحله اعتبارسنجی) به‌دست آمد. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در نسبت ۲۰/۸۰ درصد مدل پایداری بیشتری دارد. بر اساس نقشه پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی، به‌ترتیب حدود ۱۶/۷۸ و ۶/۲۹ درصد از منطقه در پهنه پتانسیل بالا و خیلی بالا قرار گرفت. همچنین بر اساس آزمون جک نایف[3] شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی و فاصله از گسل از مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی کننده در وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی در این منطقه شناسایی شدند.

کلیدواژه‌ها: پایداری، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مساحت زیر منحنی، مدل بیشینه بی‌نظمی، نسبت نمونه

نوع مقاله: پژوهشی

استناد:.جاویدان نرگس، کاویان عطااله. ارزیابی پایداری الگوریتم بیشینه بی‌نظمی برای مدل‌سازی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی در آبخیز فرح رود، استان تهران. علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱٤۰٤؛ ۱۹ (٦۹): ۲۳-۳۷

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱٤۰٤، دوره ۱۹، شماره ٦۹، صفحه ۲۳-۳۷

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

© نویسندگان

CC BY NC

۱- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، نویسنده مسئول
Narges.javidan20 @gmail.com

۲- استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری نشانی: ساری – دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری- دانشکده منابع طبیعی - گروه آبخیزداری،ساری، ایران

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

مقدمه

شناخت بهتر و اصولی منابع آب زیرزمینی یک اصل کلیدی مدیریت منابع آب محسوب شده و با توجه به افزایش نیاز کشور ایران به آب و همچنین به دلیل پتانسیل بالای آلودگی منابع آب‌های سطحی زمین، توزیع نامتعادل مکانی و زمانی این منابع، پرداختن به موضوعات مربوط به آب‌های زیرزمینی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود؛ بنابراین شناخت مناطق مستعد استخراج آب زیرزمینی هم می‌تواند مقدار آب بیشتر و باکیفیت بهتر را در اختیار قرار دهد و هم اینکه هزینه حفاری و استحصال آب زیرزمینی را کاهش دهد [۲۱]. روش‌های مختلفی برای تعیین پتانسیل آب زیرزمینی وجود دارد؛ اما نکته قابل‌توجه این است که روش‌های موجود باوجود دارا بودن دقت زیاد، نیاز به مهارت و صرف زمان و هزینه و دارند. این در حالی است که در مدل پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی مهارت زیادی نیاز نبوده و در زمان و هزینه صرفه‌جویی خواهد شد [۲٤]. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های جدید مدل‌سازی مکانی با استفاده از پارامترهای محیطی (مقدار بارندگی، سنگ‌شناسی و...) و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین پتانسیل آب زیرزمینی گامی روبه‌جلو در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی است [۱۰]. تبیین و به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌کاوی برای پیش‌بینی مکانی پتانسیل آب زیرزمینی توسط پژوهشگران مختلفی در سراسر جهان موردبررسی قرارگرفته است [۱۹،۱٤،۸]. در ایران هم محققان زیادی با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی، تابع شواهد قطعی، جنگل تصادفی، سلسله‌مراتب تحلیلی، هیبریدی جدید (LMT) به مطالعه و شناسایی مکانی پتانسیل آب زیرزمینی پرداخته‌اند [۲، ۱۱، ۱۸، ۲٤].

مدل بیشینه بی‌نظمی یکی دیگر از مدل‌های پیشرفته داده‌کاوی است که به دلیل مزایا و قابلیت‌های آن در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است از جمله [۲٦، ۲۷، ۲۸، ۳۱] به مطالعه و پهنه‌بندی فرسایش آبکندی و زمین‌لغزش با استفاده از این مدل پرداختند.

در پژوهشی نقشه بالقوه آب‌های زیرزمینی منطقه مهران توسط رحمتی و همکارن [۲۵] با استفاده از داده‌های مبتنی بر GIS حاصل از مدل‌های جنگل تصادفی و بیشینه بی‌نظمی تهیه شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل مورد استفاده در این منطقه از دقت مناسبی برخوردارند اما با تکیه بر منحنی ROC مدل ماکزیمم آنتروپی با دقت ۹۱ درصد عملکرد بهتری را نسبت به مدل جنگل تصادفی با دقت ۸۷/۷ درصد از خود نشان داد. مدل مکسنت (بیشینه بی‌نظمی) توسط گلکاریان و رحمتی[۱۱] برای شناسایی عوامل اصلی تأثیرگذار بر آب‌های زیرزمینی در دشت گناباد، ایران مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه آن‌ها از ۱۳ عامل پیش‌بینی کننده استفاده کردند. نتایج نشان داد که فاکتورهای شاخص قدرت جریان[1] (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی[2] (TWI) و سنگ‌شناسی بیشترین تأثیر را در پتانسیل آب زیرزمینی در یک منطقه معین داشته است. این نشان‌دهنده اهمیت شیب، سطح تجمع آب و ویژگی‌های سنگ در پتانسیل آب زیرزمینی است. استان تهران در زمره استان‌های رو به رشد کشور است که با پدیده افزایش جمعیت و به‌تبع آن چالش تأمین نیاز آبی در بخش‌های مختلف ازجمله شرب، کشاورزی و صنعت روبرو است. در سال‌های اخیر این استان از وضعیت منابع آب سطحی و زیرزمینی خوبی برخوردار نبوده به‌طوری‌که وزارت نیرو توسعه بهره‌برداری از منابع آب دشت‌ها را ممنوع اعلام کرده است. به دنبال افزایش مشکلات اجتماعی- اقتصادی مشابه در استان، لزوم توجه بیشتر به منابع آب زیرزمینی بیشتر احساس می‌شود. روش‌های معمول مورداستفاده برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی اصولاً بر اساس مطالعات و بازدیدهای صحرایی است؛ اما تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در هر واحد زمین‌شناسی با به‌کارگیری روش‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی روشی سودمند در سطح جهان شناخته‌شده است [۳]. مسئله اساسی موردتوجه این پژوهش این است که با تعیین پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی و اتکاء به مدل توانمند و شناخته‌شده داده‌کاوی بیشینه بی‌نظمی، به ارزیابی پایداری و دقت آن پرداخته شود.

دراین تحقیق با اعمال داده‌های تاریخی به مدل در مورد وقوع چشمه‌ها و ارزیابی عملکرد آن از طریق معیارAUC، توانایی مدل بیشینه بی‌نظمی برای پیش‌بینی وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی بررسی می‌شود و کارایی مدل در شناسایی مکان‌های بالقوه برای چشمه‌های آب زیرزمینی تعیین می‌گردد.

از طرف دیگر،با بررسی متغیرهای محیطی و هیدرولوژیکی که بر وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند، مهم‌ترین فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده برای وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی در این منطقه شناسایی می‌شود. عوامل مختلفی مانند سازندهای زمین‌شناسی، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و الگوهای کاربری اراضی و چگونگی ارتباط این متغیرها با خروجی‌های مدل تحلیل خواهد شد.

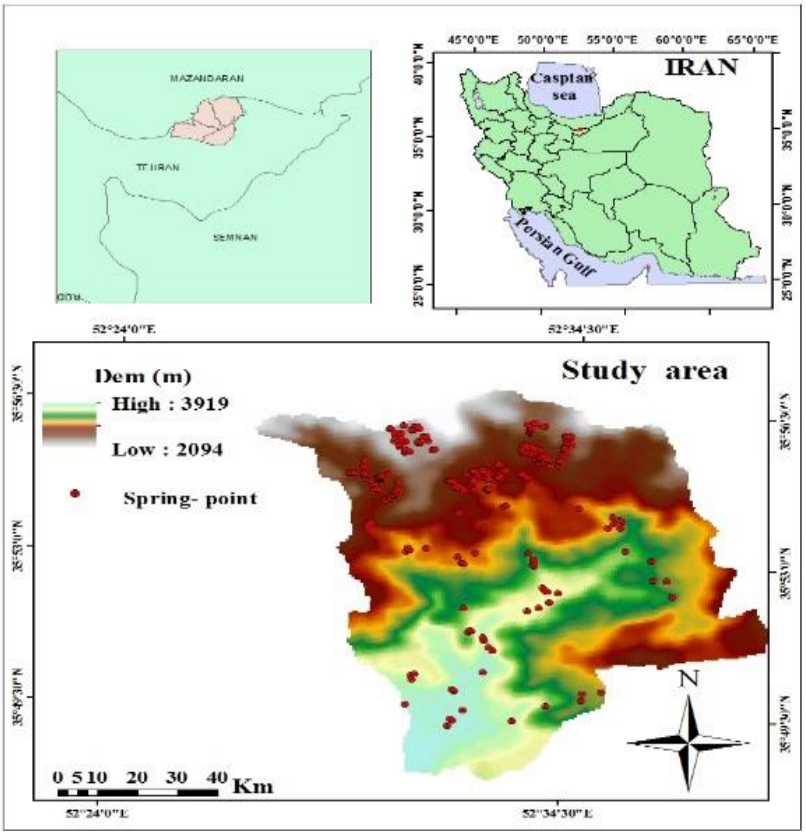
و در نهایت آزمون دقت و بررسی پایداری مدل انجام خواهد شد. هدف نهایی بر اعتبارسنجی پایداری و دقت مدل بیشینه بی‌نظمی در طول زمان و در شرایط مختلف متمرکز است. در این پژوهش سعی شده است با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌ها، تحلیل‌های حساسیت و اعتبارسنجی متقابل را انجام شود تا میزان دقت مدل در سناریوهای مختلف بررسی شود. این امر شامل ارزیابی چگونگی تأثیر تغییرات در عوامل ورودی بر پیش‌بینی‌های مدل و تعیین پایداری پیش‌بینی‌های آن است. اعتماد به قابلیت اطمینان مدل برای کاربرد بالقوه آن در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب بسیار مهم است.

1. Stream Power Index

2. Topographic wetness index

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]



شکل ۱- محدوده موردمطالعه و موقعیت چشمه‌های موجود

Fig 1. Study area and locations of existing springs

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

منطقه موردمطالعه آبخیز فرح‌رود با مساحت ۱۶۵۵۰ هکتار در استان تهران واقع‌شده است. این منطقه در مختصات ۵۲ درجه و ۲۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و ۳۵ درجه و ٤٨ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته‌است. کمینه و بیشینه ارتفاع منطقه به ترتیب ۳۹۱۹ و ۲۰۹٤ متر از سطح دریا است. ازلحاظ آب و هوایی دارای آب‌وهوای مرطوب است که در میان رشته‌کوه‌های البرز قرار گرفته است. منطقه مطالعاتی در تابستان تحت تأثیرتأثیر سیستم پرفشار جنب حاره قرار می‌گیرد که بدین لحاظ میزان بارش کم و ناچیز است، بارندگی‌های تابستانه اکثراً به دلیل عبور سیستم کم‌فشار دینامیکی است که از نواحی شمالی ایران عبور می‌کند و باعث بارش‌هایی در قسمت شمالی می‌شود. در برخی موارد جریان‌های گرم‌ومرطوب موسمی اقیانوس هند در لایه زیر جو منطقه تأثیر می‌گذارد و چنانچه با امواج سیستم‌های کم‌فشار عرض‌های میانی تداخل نماید ضمن ایجاد ناپایداری بارش‌های شدیدی را سبب می‌شود. متوسط بارندگی کل حوزه ٥٦٣ میلی‌متر است. اقلیم منطقه به روش دومارتن نیمه‌خشک بوده و توزیع فصلی بارندگی بصورت ٤٥٪ زمستان، ۲۹٪ بهار، ۲۲٪ پاییز و ۳ ٪ تابستان است. از نظرزمین‌شناسی آبرفتی و مربوط به سازندهای دوره کواترنری است. شکل ۱ موقعیت چشمه‌های موجود در منطقه و محدوده مورد مطالعه را در ایران و استان تهران نشان می‌دهد.

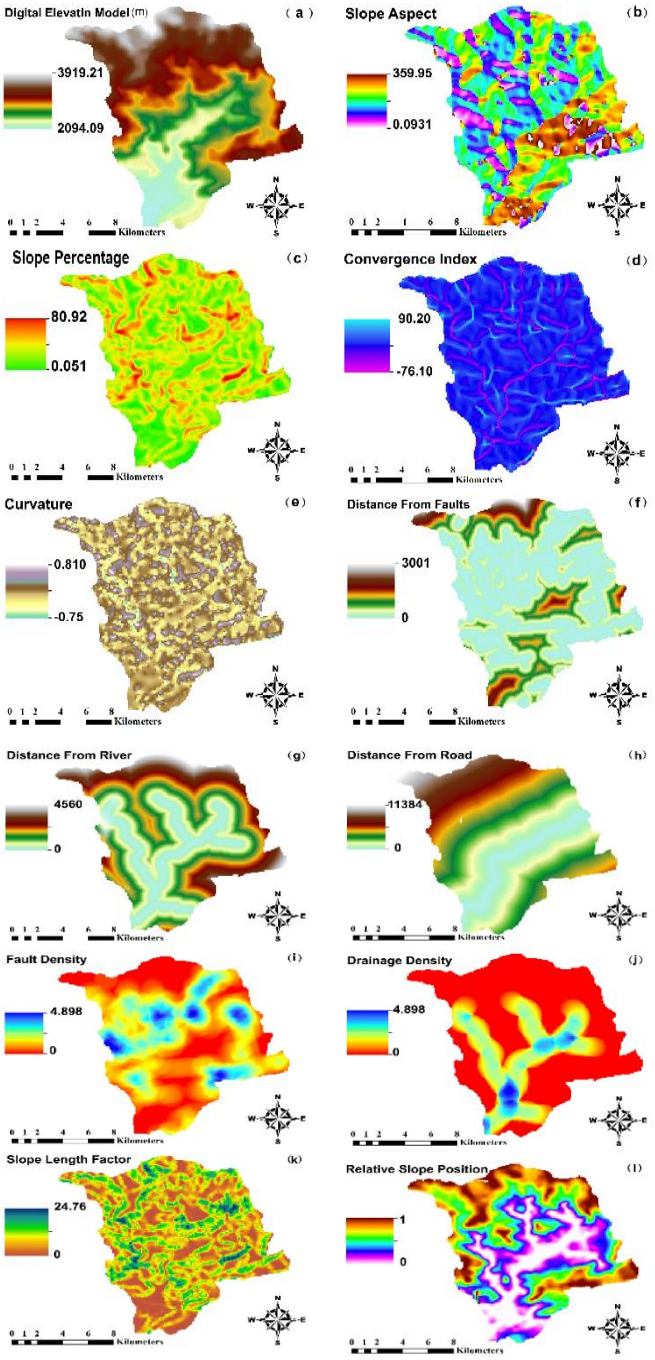
مراحل انجام این پژوهش دارای مراحل زیر است: الف. آماده‌کردن لایه‌های پیش‌بینی‌کننده. ب. تهیه نقشه پراکنش نقاط حضور چشمه‌ها. پ. اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی. ت. ارزیابی مدل با استفاده از منحنی ROC-AUC ث. ارزیابی صداقت و پایداری مدل. مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مرحله مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌کاوی تهیه نقشه پراکنش نقاط حضور پدیده است [٢٤]. در این مطالعه به‌منظور شناسایی چشمه‌های موجود در منطقه علاوه بر مطالعات گسترده صحرایی در منطقه تحقیق، به سازمان تحقیقات منابع آب ایران (تماب) مراجعه و موقعیت جغرافیایی تعداد ٤٩٥ چشمه برای اجرای مدل‌سازی جمع‌آوری شد. برای انجام مدل‌سازی باید نقاط مورداستفاده برای آموزش مدل[1] از نقاط اعتبارسنجی[2] متفاوت باشند [۱۵]؛ بنابراین روش تقسیم‌بندی تصادفی[3] [١٦] برای جدا کردن نقاط آموزشی و نقاط اعتبارسنجی مورداستفاده قرار گرفت.

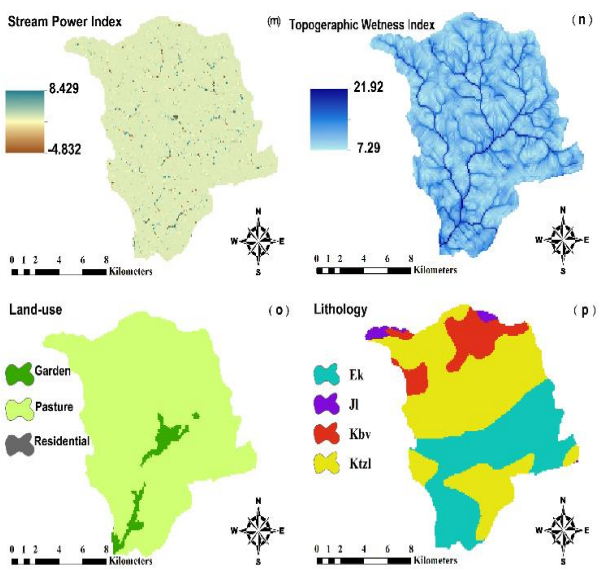
برای ارزیابی پایداری، توانایی مدل[4] و حساسیت داده‌ها مدل‌سازی

1. Training
2. validation
3.randomly partition algorithm
4. robustness

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]





شکل ۲- عوامل زمین محیطی مؤثر در چشمه‌های آب زیرزمینی: الف) مدل رقومی ارتفاعی، ب) جهت شیب، پ) درصد شیب، ت) شاخص همگرایی، ث) انحنای دامنه، ج) فاصله از گسل‌ها، ح) فاصله از رودخانه‌ها، خ) فاصله از جاده‌ها، د) تراکم گسل ذ) تراکم زهکشی ر) فاکتور طول شیب ز) موقعیت شیب نسبی، ژ) شاخص قدرت جریان، س) شاخص رطوبت توپوگرافی، ش) کاربری اراضی، ص) سنگ‌شناسی.

Fig2 . the land-environmental factors affecting the occurrence of groundwater springs) :(a) Digital elevation model, (b) slope aspect, (c) slope percentage,(d) convergence index ,(e) curvature,(f) distance from faults, (j) distance from rivers, (h) distance from roads, (i) fault density, (g) drainage density, (k) slope length factor, (l) relative slope position, (m) topographic wetness index, (n) stream power index, (o) land use, (p) lithology.

با نسبت‌های مختلف ۳۰/۷۰ درصد، ۵۰/۵۰ درصد و ۲۰/۸۰ درصد اجرا شد؛ که ۷۰، ۵۰ و ۸۰ درصد از نمونه‌ها برای آموزش مدل و ۳۰، ۵۰ و ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد [۲، ۱۲]. موقعیت‌های وقوع در مدل‌سازی به‌عنوان متغیر وابسته و عوامل محیطی مؤثر به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد [۵]. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در داخل و خارج از کشور در زمینه پتانسیل آب زیرزمینی و شرایط منطقه بررسی‌شده ۱۶عامل مؤثر بر وقوع چشمه‌ها شامل: درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، موقعیت نسبی شیب، فاکتور طول شیب، انحنای دامنه، فاصله از رودخانه‌ها، فاصله از جاده‌ها، فاصله از گسل‌ها، تراکم گسل، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص همگرایی جریان، شاخص زبری سطح و تراکم زهکشی انتخاب شدند و نقشه آن‌ها در سامانه ArcGIS10.5 وSAGA[1] تهیه شد (شکل ۲).

به‌منظور شناخت خصوصیات زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه و تهیه نقشه سنگ‌شناسی از چندین نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مطالعاتی در جدول ۱ نشان داده‌شده است. نقشه کاربری اراضی منطقه

1. System for automated geoscientific analyses

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]
[DOI: 10.22034.19.69.2]

موردمطالعه از اداره آبخیزداری استان تهران تهیه شد که اساس تهیه این نقشه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست بوده است. برای تجزیه‌وتحلیل تصاویر ماهواره‌ای از تصاویر ETM^{+} سال ۲۰۲۰ برگرفته از سایت GLOVIS[1]استفاده‌شده است. نقشه مزبور پس از انجام مطالعات صحرایی و تطبیق آن با واقعیات کاربری اراضی منطقه، تصاویر گوگل ارث و تصاویر ماهواره‌ای اصلاح شد. مدل رقومی ارتفاعی منطقه موردمطالعه از اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان تهران که با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ با تفکیک مکانی ۳۰×۳۰ متر به‌دست‌آمده بود، تهیه شد. با توجه به این‌که هم‌خطی یکی از دلایل افزایش خطا و کاهش کارایی مدل بوده و ممکن است به پیش‌بینی‌های خارج از دامنه مورد انتظار منجر شود، ازاین‌رو پیش از فرایند مدل‌سازی این موضوع می‌بایست بررسی شود. بعد از آماده‌سازی لایه‌ها، برای آنالیز این داده‌ها و بررسی هم‌خطی آن‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. با کنترل کردن شاخص‌های آستانه تحمل[2] و عامل تورم واریانس[3] (VIF)، می‌توان قضاوت درستی در مورد هم‌خطی داشت [۹]. شرط هم‌خطی بودن لایه‌ها این است که VIF بیشتر از پنج و آستانه تحمل کمتر از ۰/۱ باشد [۲۰]. با برقرار بودن این شرط لایه‌های داری همبستگی حذف و دوباره مدل بدون آن لایه اجرا می‌شود. بررسی همبستگی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که این مقادیر به حالت نرمال برسند. در پژوهش حاضر با انجام این آزمون لایه‌ی شاخص زبری سطح از بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده حذف شد.

جدول ۱- سازندهای سنگ‌شناسی حوزه آبخیز فرح‌رود

Table 1. Lithostratigraphic formations of the Farahroud watershed

Group	Cod	Formation
گروه	کد	سازند
۱	Ek	Karaj کرج
۲	Jl	Lar لار
۳	Kbv	-
٤	Ktzl	Tizkuh تیزکوه

مدل بیشینه بی‌نظمی

مدل بیشینه بی‌نظمی یکی از مدل‌های پیشرفته‌ی یادگیری ماشینی است که در زمینه‌های مختلف علوم محیطی توانایی پیش‌بینی دارد [۲۳]. این مدل تنها بر اساس موقعیت وقوع و نقاط مثبت (در این مطالعه نقاط وقوع چشمه) مدل‌سازی را انجام می‌دهد، درحالی‌که سایر مدل‌ها علاوه بر موقعیت‌های پدیده، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع نیز هستند. از دیگر توانایی‌های مهم مدل بیشینه بی‌نظمی، حساسیت آن به تعداد نقاط حضور است [۱۳]؛ بنابراین در مناطقی که تعداد وقایع موردبررسی زیاد نیست می‌تواند پیش‌بینی‌های مناسبی ارائه دهد. این مدل توزیع احتمالاتی داده‌های هریک از متغیرهای رستری مربوط به لایه‌های مؤثر بر وقوع را استخراج نماید. آنتروپی این توزیع‌ها بر اساس رابطه (۱) قابل‌محاسبه است [۲۲]:

$$H(\hat{\pi}) = -\sum_{x\in X} \hat{\pi}(x) \ln\hat{\pi}(x) \qquad (۱)$$

که در آن $H(\hat{\pi})$ مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر موردنظر، ln لگاریتم طبیعی، x ارزش هر سلول و X مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. در این مطالعه همبستگی نقاط وقوع چشمه با فاکتورهای مؤثر بر وقوع آن محاسبه و همبستگی متغیرها با ۱۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه به‌عنوان نقاط زمینه مقایسه می‌شود و از این طریق بی‌نظمی نسبی میان موقعیت وقوع چشمه‌ها و نقاط تصادفی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر ازآنجاکه یافتن نقاط عدم وقوع چشمه و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات در پی خواهد داشت، استفاده از مدل MaxEnt به‌عنوان یک مدل وابسته به نقاط وقوع، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از عدم قطعیت‌ها و ناکارآمدی‌های ناشی از نقاط عدم حضور شود. این مدل قادر است که مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر وقوع چشمه‌ها را با استفاده از آزمون Jackknife انجام دهد. در این آزمون با استفاده از روش حذفی، در هر مرحله یکی از متغیرهای مستقل حذف‌شده و مدل‌سازی بدون آن متغیر انجام می‌شود. سپس میزان افت دقت نقشه نهایی (میزان کاهش دقت) به ازای حذف آن متغیر محاسبه می‌شود [۲۲،۲۳،۲۵]. این مدل در محیط MAXENT بااستفاده از نرم‌افزارMaximum Entropy Species Distribution Modeling, Version 3.3.3k انجام شد.

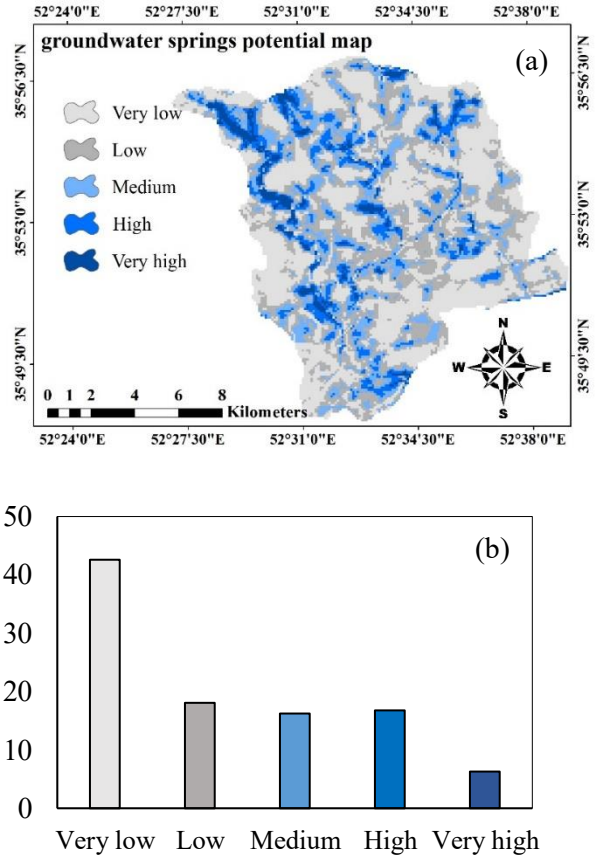
ارزیابی دقت و میزان پایداری[4] مدل

برای ارزیابی مدل بیشینه بی‌نظمی با استفاده از روش منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، احتمال تشخیص درست نقاط وقوع چشمه توسط مدل با احتمال تشخیص صحیح نقاط عدم وقوع مورد مقایسه قرار می‌گیرد [۷]. ارزیابی عملکرد مدل در مرحله آموزش بر اساس نقاط وقوع گروه آموزش انجام می‌شود درحالی‌که دقت پیش‌بینی مدل بر اساس داده‌های گروه اعتبارسنجی ارزیابی می‌شود (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۲). در یک تقسیم‌بندی، تقسیم ۰/۹-۱ دقت عالی، ۰/۸-۰/۹ دقت بسیار خوب، ۰/۷-۰/۸ دقت خوب، ۰/٦-۰/۷ دقت متوسط و ۰/٦-۰/۵ دقت ضعیف را برای ارزیابی تخمین ارائه کرده‌اند [٤]. به دلیل اینکه منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، به‌طور هم‌زمان دو معیار حساسیت و تشخیص را در نظر می‌گیرد، گیرنده به‌عنوان جامع‌ترین روش در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. پایداری مدل از نسبت دقت مدل در مرحله آموزش به مرحله‌ی

1. The USGS Global Visualization Viewer
2. Tolerance
3. Variance Inflation Factor (VIF)
4. Stability

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]



شکل ۳-الف: نقشه پیش‌بینی مکانی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی ب: فراوانی نسبی کلاس‌های استعداد پیش‌بینی مکانی پتانسیل چشمه آب زیرزمینی.

Fig 3. a: Spatial prediction map of groundwater spring potential, b: Relative frequency of the prediction classes of groundwater spring potential.

اعتبارسنجی به دست می‌آید [۲]. در این پژوهش برای هر سه نسبت نمونه (۳۰/۷۰، ۵۰/۵۰، ۲۰/۸۰) به‌دست آمد. هرچقدر مقدار پایداری به‌دست‌آمده نزدیک یک باشد نشان‌دهنده این است که دقت مدل در هر دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی به هم نزدیک بوده که این موضوع در مدل‌سازی بسیار ارزشمند است؛ بنابراین ارزیابی پایداری مدل بر اساس معادله (۲) انجام شد:

$$H(\hat{\pi}) = -\sum_{x\in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \qquad (۲)$$

که $S_{AUC\text{-}ROC}$، پایداری مدل است که حاصل نسبت آموزش و اعتبارسنجی AUC-ROC مدل است.

نتایج

نقشه پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی

پس از انجام مدل‌سازی مکانی، نقشه پیش‌بینی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی تهیه شد. شکل (۳ –الف) پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی را برای نسبت نمونه ۲۰/۸۰ درصد نشان می‌دهد. فراوانی نسبی کلاس‌های استعداد پتانسیل آب زیرزمینی درشکل (۳ –ب) ارائه‌شده است.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل بر اساس معیار (AUC).

Table 2. Model evaluation results based on the (AUC) criterion

Evaluation criterion. (AUC) معیار ارزیابی	Sample ratio اندازه نمونه‌ها	Prediction accuracy دقت پیش‌بینی
Training آموزش	٪70	0.940
	٪80	0.953
	٪50	0.871
Validation اعتبارسنجی	30%	0.794
	20%	0.927
	50%	0.826

جدول ۳- ارزیابی میزان پایداری مدل.

Table 3. Evaluation of model stability.

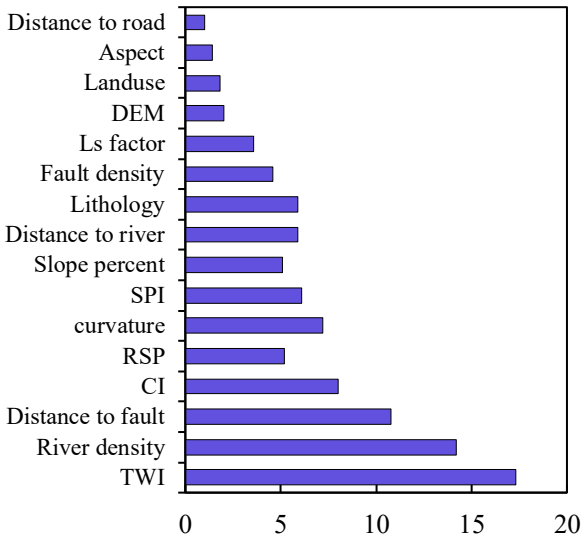
Sample ratio اندازه نمونه‌ها	model stability پایداری مدل
70/30	1.183
80/20	1.02
50/50	1.05

نتایج ارزیابی نقشه پیش‌بینی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی

نقشه پیش‌بینی مکانی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی بر اساس منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) اعتبارسنجی شد. همچنین مساحت زیر این منحنی‌ها (AUC) برای مدل محاسبه شد که نتایج آن برای هر نسبت نمونه برای دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی در جدول ۲ نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دقت مدل بالای ۸۷ درصد در هر ۳ بار اجرای مدل (مقدار ۵۰، ۷۰ و ۸۰ درصد نمونه‌ها) در مرحله آموزش محاسبه شد. در مرحله اعتبارسنجی برای هر سه نسبت (۳۰، ۵۰ و ۲۰ درصد نمونه‌ها) دقت بالای ۷۹ درصد به دست آمد. نتایج سنجش پایداری مدل که از نسبت دقت مدل در مرحله آموزش به مرحله اعتبارسنجی برای هر سه نسبت نمونه به دست می‌آید، در جدول ۳ ارائه‌شده است.

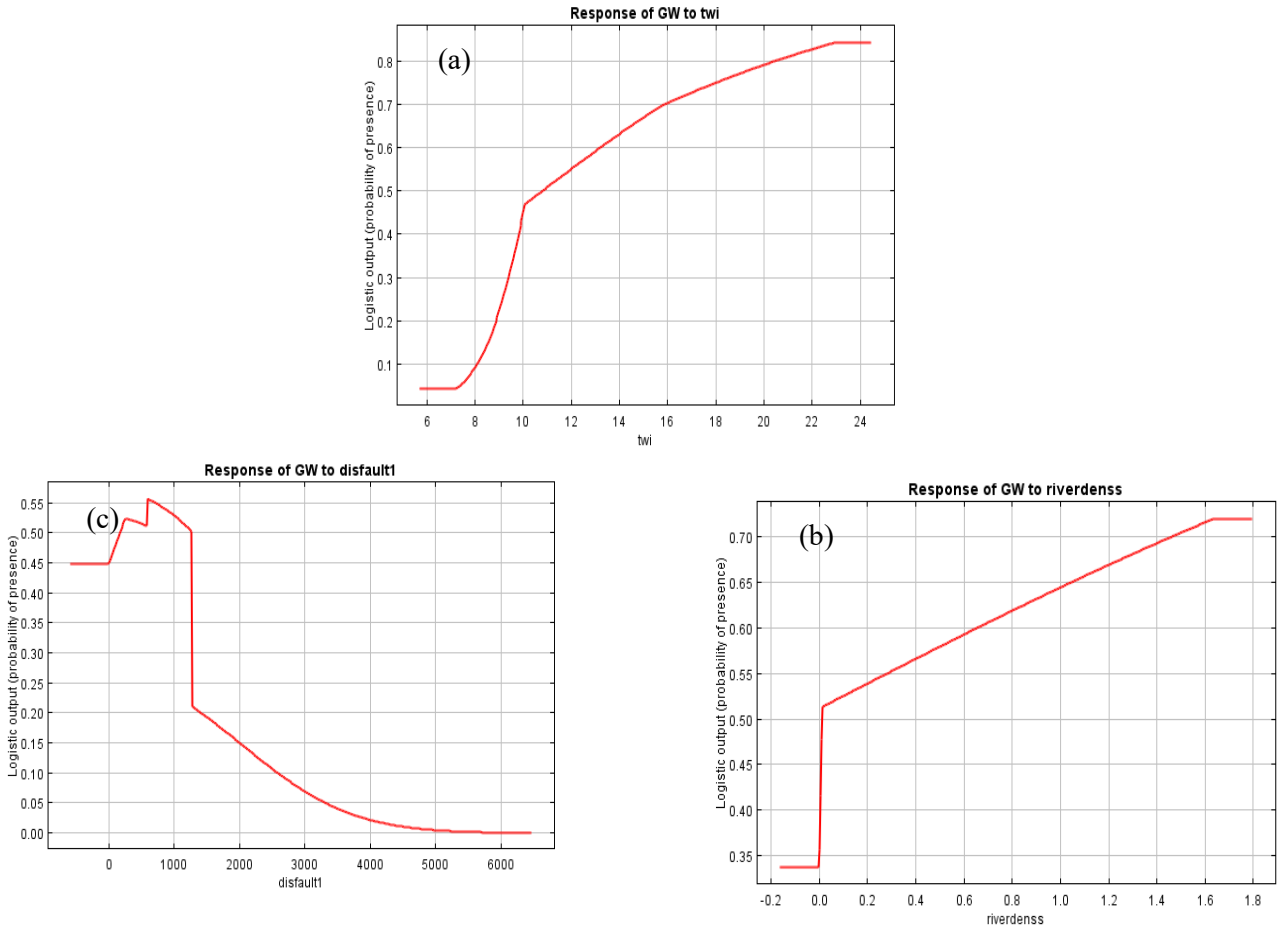
[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]



شکل ٤- سهم نسبی متغیرهای زمین محیطی برای مدل‌سازی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی بر اساس مدل بیشینه بی‌نظمی.

Fig 4. Relative contribution of environmental variables for modeling the groundwater springs potential based on the Maximum Entropy model.



شکل ٥- منحنی‌های پاسخ برای فاکتورهای پیش‌بینی کننده اصلی . الف:شاخص رطوبت توپوگرافی، ب: تراکم زهکشی، پ: فاصله از گسل.

Fig 5. Response curves for the primary predictive factors, a: Topographic wetness index, b: Drainage density, c: Distance from fault.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

نتایج اثرگذاری متغیرهای مستقل محیطی بر پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی

شکل ٤ سهم نسبی متغیرهای ورودی در پیش‌بینی مکانی پتانسیل آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی و فاصله از گسل به ترتیب با مقادیر ۱۷/۳، ٤،١٤/٢ /١٠ درصد به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر پتانسیل‌یابی چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه شناسایی شدند. همچنین متغیرهای، شاخص همگرایی و موقعیت شیب نسبی دارای اهمیت متوسط بودند. حساسیت مدل به فاکتورهای فاصله از جاده و جهت شیب زیاد نیست و کمبود این دو عامل توسط عوامل دیگر قابل جبران است. شکل ۵ منحنی‌های پاسخ مربوط به سه عامل مهم پیش‌بینی کننده را نشان می‌دهد. همانطور که شکل ۵(a و b) نشان می‌دهد با افزایش رطوبت توپوگرافی و تراکم زهکشی، آب زیرمینی افزایش می‌یابد. همچنین براساس شکل ۵(c) هرچقدر فاصله از گسل افزایش می‌یابد مقدار آب زیرزمینی کاهش پیدا می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

پتانسیل‌یابی و تعیین توزیع مکانی مناطقی که ازنظر دسترسی به آب‌های زیرزمینی پتانسیل بالایی دارند برای مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی بسیار مفید خواهد بود. به شناسایی این مکان‌ها در مبحث مدل‌سازی « پیش‌بینی حساسیت» اطلاق می‌شود. با توجه به اینکه آزمایش‌های اکتشافی برای آب‌های زیرزمینی هزینه‌بر هستند، تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های جدید برای بهره‌برداری مناسب و اصولی از این منابع بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی قابلیت الگوریتم بیشینه بی‌نظمی (MaxEnt) در پیش‌بینی وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی در حوزه آبخیز فرح‌رود است. یافته‌های ما نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند به طور مؤثر توزیع فضایی این چشمه‌ها را مدل‌سازی کند و پیشرفت قابل‌توجهی نسبت به روش‌های مدل‌سازی سنتی ارائه دهد. شرط موفقیت و عملکرد[1] یک الگوریتم یادگیری ماشین در مرحله آموزش، بستگی به انتخاب دقیق و صحیح عوامل مؤثر دارد. بر اساس مرور منابع داخل و خارج از کشور، عوامل پیش‌بینی‌کننده برای بررسی پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 و SAGA تهیه شد (شکل ۲). برای جدا کردن نقاط آموزشی و نقاط اعتبارسنجی الگوریتم تقسیم‌بندی تصادفی مورداستفاده قرار گرفت. برای آنالیز عدم قطعیت و ارزیابی پایداری مدل، نسبت‌های نمونه ۳۰/۷۰، ۵۰/۵۰ و ۲۰/۸۰ درصد در نظر گرفته شد و مدل‌سازی برای هر سه مجموعه انجام شد. بر اساس جدول ۲ مشاهده می‌شود، دقت مدل بالای ۸۷ درصد در هر سه بار اجرای مدل (مقدار ۷۰،۵۰ و ۸۰ درصد نمونه‌ها) در مرحله آموزش محاسبه شد. در مرحله اعتبارسنجی برای هر سه نسبت (۳۰، ۵۰ و ۲۰ درصد نمونه‌ها) دقت بالای ۷۹ درصد به‌دست آمد که براساس تقسیم‌بندی [۵] کارایی بسیار خوب برای مدل در مرحله‌ی آموزش و کارایی خوب در مرحله‌ی اعتبارسنجی به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد زمانی که مدل‌سازی با نسبت ۲۰/۸۰ درصد انجام شد دقت بالاتری (۰/۹۵ در مرحله‌ی آموزش و ۰/۹۲ در مرحله‌ی اعتبارسنجی) بر اساس شاخص راک به دست آمد؛ زیرا در یادگیری ماشین و مدل‌سازی آماری، مقدار داده‌های مورد استفاده برای آموزش می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر توانایی مدل برای تعمیم به سایر داده‌ها تأثیر بگذارد. یک مجموعه آموزشی بزرگ‌تر (در این مورد، ۸۰ درصد) به مدل اجازه می‌دهد تا در مورد الگوهای اساسی و روابط در داده‌ها اطلاعات بیشتری کسب کند. این یادگیری جامع معمولاً منجر به مدلی قوی‌تر می‌شود که می‌تواند نتایج را در صورت اعمال بر داده‌های جدید بهتر پیش‌بینی کند. از طرفی ۲۰ درصد باقی‌مانده از داده‌ها به‌عنوان مجموعه اعتبارسنجی عمل می‌کند. یک مجموعه اعتبارسنجی کوچک‌تر هنوز هم می‌تواند تخمین قابل اعتمادی از عملکرد مدل ارائه دهد، به‌ویژه زمانی که مدل به‌خوبی تنظیم شده باشد و مجموعه آموزشی به اندازه کافی بزرگ باشد. در مقابل، استفاده از یک تقسیم متعادل‌تر (مانند ۵۰/۵۰ یا ۳۰/۷۰) ممکن است مقدار داده های موجود برای آموزش را محدود کند و می‌تواند منجر به بیش از حد برازش شود، جایی که مدل در داده‌های آموزشی به‌خوبی عمل می‌کند اما نمی‌تواند به مجموعه اعتبارسنجی تعمیم یابد. همچنین مجموعه آموزشی بزرگ‌تر قدرت آماری بیشتری را ارائه می‌کند و به مدل اجازه می‌دهد تا پیچیدگی عوامل ژئومحیطی را که بر چشمه‌های آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند، به طور مؤثرتری ثبت کند. این امر به‌ویژه در مطالعات محیطی که در آن روابط ممکن است خطی نباشند یا ممکن است شامل تعامل بین متغیرهای متعدد باشد، مرتبط است. تجزیه و تحلیل منحنی ROC نشان داد که توانایی پیش‌بینی مدل در طول دوره‌های مختلف زمانی که با نمونه ۸۰ درصدی آموزش داده می‌شد سازگارتر بود. این نشان می‌دهد که مدل به ثبات بیشتری دست یافته است، زیرا نسبت به نمونه‌های خاص موجود در مجموعه آموزشی حساسیت کمتری داشت. پایداری بیشتر اغلب در مدل‌سازی محیطی بسیار مهم است، جایی که هزینه‌های پیش‌بینی‌های نادرست می‌تواند قابل توجه باشد [۲۹].

به طور خلاصه می‌توان گفت، دقت و پایداری برتر مدل با استفاده از نسبت آموزش به اعتبارسنجی ۲۰/۸۰ را می‌توان به افزایش ظرفیت یادگیری که توسط مجموعه آموزشی بزرگ‌تر، تعمیم بهتر به داده‌های استفاده نشده و کاهش تنوع در عملکرد مدل تسهیل می‌شود، نسبت داد. این عوامل در مجموع به یک رویکرد مدل‌سازی مطمئن‌تر و موثرتر برای پیش بینی پتانسیل چشمه آب زیرزمینی در حوزه آبخیز فرح‌رود کمک می‌کنند. بنابراین باوجوداینکه در اکثر مطالعات مربوط به مدل‌سازی از نسبت ۳۰/۷۰ درصد برای جداسازی نمونه‌ها

1. Goodness of fit

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

استفاده می‌شود، یافته‌های این پژوهش ثابت کرد زمانی که مدل‌سازی با نسبت ۲۰/۸۰ درصد انجام شود نتایج و عملکرد بهتری خواهد داشت؛ که بر اساس تقسیم‌بندی [۳] در گروه پیش‌بینی عالی قرار گرفت؛ که این نتایج بیانگر توانایی بالای مدل مکسنت در پیش‌بینی و ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی است [۲۱]. این موضوع توسط رجبی و همکاران[۲۹] که به تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی بااستفاده از دو مدل جنگل تصادفی و ماکزیمم آنتروپی در منطقه مهران ایران اقدام کردند و از منحنی ROC برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده کردند قابل تأیید است. همچنین در این پژوهش پایداری مدل که از نسبت دقت مدل در مرحله‌ی آموزش به مرحله‌ی اعتبارسنجی به دست می‌آید مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان پایداری برای هر سه نسبت نمونه (۳۰/۷۰، ۵۰/۵۰، ۲۰/۸۰) به دست آمد (جدول ۳). هرچقدر مقدار پایداری به‌دست‌آمده نزدیک یک باشد نشان‌دهنده این است که دقت مدل در هر دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی به هم نزدیک بوده که این موضوع در مدل‌سازی بسیار ارزشمند است [۲]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در نسبت ۲۰/۸۰ درصد مقدار پایداری به‌دست‌آمده نزدیک‌تر به یک بوده و زمانی که از این نسبت برای مدل‌سازی استفاده می‌شود مدل‌سازی پایداری بالاتر دارد؛ بنابراین ارزیابی دقت و پایداری مدل مکسنت، نشان داد که این مدل قدرت پیش‌بینی بالایی را در سناریوهای مختلف حفظ می‌کند و در برابر تغییرات داده‌های ورودی استحکام خود را نشان می‌دهد. این پایداری برای کاربردهای عملی حیاتی است، زیرا نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند به طور قابل اعتمادی استراتژی‌های مدیریت آب را حتی با نوسانات شرایط محیطی اطلاع دهد. با استفاده از مجموعه متنوعی از پارامترهای ورودی از جمله ترکیب زمین‌شناسی، ویژگی‌های توپوگرافی و عوامل آب و هوایی مشخص شد که مدل مکسنت روابط پیچیده حاکم بر وقوع چشمه‌های آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. یکی از بینش‌های مهم از تجزیه‌وتحلیل این مطالعه، شناسایی عوامل کنترل کننده‌ای بود که بر ظهور چشمه‌های آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. نتایج آزمون جک نایف نشان داد شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی و فاصله از گسل به ترتیب با مقادیر ۱۷/۳، ۱٤/۲، ۱۰/٤ درصد به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر پتانسیل‌یابی چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه شناسایی شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که بسیاری از عوامل که در مناطق مطالعاتی دیگر از عوامل مهم برای تعیین پتانسیل آب زیرزمینی بوده‌اند، در این منطقه نقش خود را در پتانسیل آب زیرزمینی ازدست‌داده‌اند. مثلاً در مطالعه ال-شبیب[۱] سنگ‌شناسی، DEM، فاصله تا جاده، فاصله تا رودخانه از مهم‌ترین عوامل در مدل‌سازی شناخته شدند. بنابراین تعیین مناطق بهینه برای پتانسیل آب زیرزمینی به چندین عامل اساسی محدود می‌شود، شاید دلیل این امر متفاوت بودن شرایط اقلیمی، خاک‌شناسی، پوشش‌گیاهی و ... در مناطق مختلف باشد. در مطالعه [۱۱] فاکتورهای SPI و TWI بیشترین تأثیر و سنگ‌شناسی شیب و فاصله رودخانه تأثیر متوسطی را در پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه گناباد داشته است ؛ که تا حدودی نتایج این مطالعه را تائید می‌کند. ازآنجاکه TWI در شیب‌های کم و مناطق با تجمع جریان گسترده افزایش می‌یابد، بیشترین TWI مربوط به مناطق دشتی است. وجود روند افزایشی در پتانسیل آب زیرزمینی با افزایش TWI (شکل ۵-الف) نشان‌دهنده اهمیت مناطق دشتی از نظر این عامل است. مطابق با شکل (۵-ب) هرچه تراکم آبراهه بیشتر باشد، مقدار نفوذپذیری سنگ‌ها کمتر و بنابراین سرعت جریان سطحی کمتر و درنتیجه باعث اشباع شدن لایه‌های سطح‌الارضی می‌شود [٦]. بستر و حاشیه رودخانه مکان مناسبی برای نفوذ و بازانباشت مجدد سفره‌های آبخوان است و با افزایش تراکم زهکشی، وسعت این مناطق نیز افزایش می‌یابد [۱۱]. نتایج به‌دست‌آمده با مطالعه ذبیحی و همکاران [۳۰] که به تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در دشت بجنورد پرداختند همخوانی دارد. وجود رابطه معکوس بین فاصله از گسل و پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی نیز از دیگر نتایج پژوهش حاضر است (شکل ۵-پ). این نتیجه بدان معناست که هرچه فاصله از گسل کمتر باشد، احتمال ظهور چشمه بیشتر است. دلیل این امر، امکان ورود آب زیرزمینی به سطح در مناطق نزدیک به گسل است. در این میان، نتایج نشان داد که درک این فعل و انفعالات به ما امکان می‌دهد تا تفسیر دقیق‌تری از پدیده‌های جغرافیایی زیربنایی وقوع چشمه‌ها ایجاد کنیم.

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، مدل‌های پیشرفته‌ی زیادی برای این منظور بسط و توسعه‌یافته‌اند و روزبه‌روز این روش‌ها درحال‌توسعه استفاده می‌باشند. باوجود تحقیقات مختلف صورت گرفته بااستفاده از این روش‌های نوین، عدم قطعیت‌های زیادی در استفاده از آن‌ها وجود دارد. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت باوجوداینکه در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده برای بررسی پدیده‌های طبیعی تنها از نسبت نمونه‌ی ۳۰/۷۰ درصد برای جداسازی نمونه‌ها و ارزیابی مدل‌ها پرداخته‌شده است. درحالی‌که باید مدل‌ها با نسبت‌های مختلف نمونه و مورد ارزیابی قرار بگیرند؛ زیرا ممکن است زمانی که مدل‌سازی با نسبت۲۰/۸۰ درصد انجام شود نتایج و عملکرد بهتری داشته باشد. این نتیجه را می‌توان به چندین عامل نسبت داد؛ مثلاً با یک مجموعه داده آموزشی ۸۰ درصدی، مدل به طیف گسترده‌تری از نقاط داده دسترسی دارد و به آن اجازه می‌دهد الگوها و روابط زیربنایی درون مجموعه داده را به طور مؤثر یاد بگیرد. این امر تعمیم‌پذیری مدل را افزایش می‌دهد و آن را قادر می‌سازد در طول اعتبارسنجی بهتر عمل کند. از طرفی با داده‌های بیشتر، مدل برای تشخیص ویژگی‌های مرتبطی که به پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی کمک می‌کنند، مجهزتر است و منجربه بهبود عملکرد اعتبارسنجی می‌شود. همچنین افزایش حجم نمونه در مرحله آموزش منجر به معناداری آماری بیشتر در آموزش مدل می‌شود. این می‌تواند قابلیت اطمینان و سازگاری نتایج را بهبود بخشد، که در پایداری مدل در طول اعتبارسنجی منعکس می‌شود. مطالعاتی که توسط رجبی و همکاران [۲۹] برای تهیه‌ی نقشه‌ی سیل

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

در استان گلستان انجام شد این نتایج را تایید می‌کند.

همچنین در مطالعه‌ای که توسط مالیک و همکاران [۱۷] در یک حوزه آبخیز در عربستان صعودی انجام شد از نسبت ۸۰ درصد به ۲۰ درصد برای جداکردن نقاط آموزشی و اعتبارسنجی برای تهیه‌ی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شد، که نتایج این مطالعه بیانگر دقت بالای نقشه نهایی است. در نهایت نقشه نهایی پیش‌بینی‌شده برای نسبت نمونه ذکرشده با استفاده از فاصله شکستن طبیعی[1] در پنج پهنه بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی شد [۱۱]. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ٤-ب به ترتیب حدود ١٦/٧٨ و ٦/٢٩ درصد در پهنه بالا و خیلی بالای پتانسیل قرار گرفت. در نتیجه، این مطالعه کارایی الگوریتم بیشینه بی‌نظمی را به عنوان ابزاری قوی برای مدل‌سازی چشمه‌های آب زیرزمینی حوزه آبخیز فرح رود تأئید می‌کند. با برجسته کردن قدرت و پایداری پیش‌بینی آن، استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی را در ارزیابی‌های هیدرولوژیکی منطقه‌ای و برنامه‌ریزی منابع آب توصیه می‌شود. توانایی پیش‌بینی دقیق مکان‌ها و رفتار چشمه‌های آب زیرزمینی برای مدیریت پایدار در مناطق کم‌آب حیاتی است. این تحقیق نه تنها تأثیر متقابل بین عوامل کلیدی محیطی و رخدادهای چشمه را روشن می‌کند، بلکه چارچوبی را برای مطالعات آینده برای اصلاح بیشتر این مدل‌ها فراهم می‌کند. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند تحقیقات بیشتری را در مورد استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته در مدل‌سازی هیدرولوژیکی تحریک کند و به فرآیندهای تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر در مورد شیوه‌های حفاظت و مدیریت آب کمک کند. در پژوهش‌های آینده باید بر روی ادغام مجموعه داده‌های جامع‌تر، از جمله تصاویر ماهواره‌ای و فناوری‌های سنجش از راه دور تمرکز کرد تا قابلیت‌های پیش‌بینی مدل مکسنت را بیشتر تقویت کند. گسترش این تحقیق فراتر از حوزه آبخیز فرح‌رود، درک منابع آب‌زیرزمینی را در مناطق مختلف زمین‌شناسی و مناطق اقلیمی تسهیل می‌کند و بر مزایای گسترده استفاده از الگوریتم حداکثر بی‌نظمی در هیدرولوژی تاکید می‌کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله قدردانی خود را از سازمان تحقیقات منابع آب ایران (تماب) و اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان تهران به دلیل همکاری و ارائه داده‌ها و امکانات لازم ابراز می‌داریم. همچنین از داوران محترم و ویراستاران مجله که با نظرات سازنده خود به بهبود کیفیت مقاله کمک کردند، تشکر می‌کنیم.

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

نرگس جاویدان: جمع‌آوری داده‌ها، مدل‌سازی، ، طراحی پژوهش، تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله، ویرایش مقاله
عطاله کاویان: نظارت علمی، بازبینی انتقادی محتوا، تأیید نسخه نهایی.

منابع مورد استفاده

1. Al-Shabeeb, A.R. Hamdan, I. Al-Fugara, A.K. Al-Adamat, R. and lrawashdeh, M. 2023. Spatial mapping of water spring potential using four data mining models. Water Supply, 23(5), 1743-1759. https://doi.org/10.2166/ws.2023.087.

2.Conoscenti, C. Angileri, S. Cappadonia, C. Rotigliano, E. Agnesi, V. and Märker, M. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy). Geomorphology, 204: 399–411. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021.

3. Davoodi Moghaddam, D. Rezaei, M. Pourghasemi, H.R. Pourtaghie, Z.S. and Pradhan, B. 2013. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. Arab J Geosci. https://doi: 10.1007/s12517-013.

4.Devkota, K.C. Regmi, A.D. Pourghasemi, H.R. Yoshida, K. Pradhan, B. and Ryu, I.C. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. Natural Hazards, 65(1):135–165. DOI 10.1007/s11069-012-0347-6.

5. Dube, F. Nhapi, I. Murwira, A. Gumindoga, W. Goldin, J. and Mashauri, D.A. 2014. Potential of weight of evidence modeling for gully erosion hazard assessment im Mbire Distract- Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth, 67()57–43 :. https://doi.org/10.1016/j.pce.2014.02.002.

6. Demir, G. Aytekin, M. and Akgun, A. 2015. Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods: an example from Niksar–Resadiye (Tokat, Turkey). Arabian Journal of Geosciences, 8(3): 1801–1812. DOI 10.1007/s12517-014-1332-z.

7. Elith, J. Phillips, S.J. Hastie, T. Dudík, M. Chee, Y.E. and Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Divers Distribution, 17(1): 43–57. https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x

1. Natural break

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

/10.1080/10106049.2021.1939439.

18.Naghibi, S.A. Pourghasemi, H.R. and Dixon, B. 2016. GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. Environmental monitoring and assessment, 188(1):1–27. DOI 10.1007/s10661-015-5049-6.

19.Nguyen, P.T. Ha, D.H. Avand, M. Jaafari, A. Nguyen, H.D. Al-Ansari, N. Van Phong, T. Sharma, R. Kumar, R. Le, H.V. and Ho, L.S. 2020. Soft computing ensemble models based on logistic regression for groundwater potential mapping. Applied Sciences, 10(7): 2469–2480. https://doi.org/10.3390/app10072469.

20. Ozdemir, A. 2011. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey)using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. J. Hydrology,411 : 290–308. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.010.

21.Pearce, J. and Ferrier, S. 2000. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. Ecol Model,3)133):225–245. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00322-7.

22.Phillips, S. Anderson, R. and Schapire, R. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. Ecol. Model, 190: 231–259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.

23. Park, N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. Environmental Earth Sciences, 73(3): 937–949. DOI 10.1007/s12665-014-3442-z.

24. Pourghasemi, H.R. Moradi, H.R. Fatemi Aghda, S.M. Gokceoglu, C. and Pradhan, B. 2013.GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). Arab J Geosci, 7: 1857–1878. https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-012-0825-x.

25. 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. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.010

26. Saeedian, H. Shirani, K. Aghamirzadeh, S. Sh. and Madanchi, P. 2019. The role of effective morphometric factors in the accuracy of gully erosion zoning using the maximum entropy model (case study: Sarab Halil watershed, Kerman province). Integrated Watershed Management, 3(9-3), 63-83. https://doi.org/10.22034/iwm.2023.2007115.1092

8. Fienen, M. Masterson, J.P. Plant, N.G. Gutierrez, B.T. and Thieler, E.R. 2013. Bridging groundwater models and decision support with a Bayesian network. Water Resources Research, 49(10): 6459–6473. doi:10.1002/wrcr.20496.

9. Greene, W.H. 2000. Econometric Analysis (4th Edition), Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

10. Gaur, S. Chahar, B.R. and Graillot D. 2011. Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(1):127-139. doi.org/10.1016/j.jag.2010.09.001.

11. 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

12.Javidan, N. Kavian, A. Pourghasemi, H.R. Conoscenti, C. and Jafarian, Z. 2020. Gully Erosion Susceptibility Mapping Using Multivariate Adaptive Regression Splines-Replications and Sample Size Scenarios. Water, 11(11): 2319–2340. doi.org/10.3390/w11112319.

13. Kornejady, A. Ownegh, M. and Bahremand, A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. Catena, 152: 144–162. doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.010.

14. Kochhar, A. Singh, H. Sahoo, S. Litoria, P.K. and Pateriya, B. 2021. Prediction and forecast of pre-monsoon and post-monsoon groundwater level: using deep learning and statistical modelling. Modeling Eart Systems and Environment, 8(2): 2317–2329. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01235-z.

15. Lee, S. Kim, J.C. Jung, H.S. Lee, M.J. and Lee, S. 2017. Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2): 1185–1203. doi.org/10.1080/19475705.2017.1308971.

16.Moore, I.D. Grayson, R.B. and Ladson A.R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrol Process, 5:3–30. doi.org/10.1002/hyp.3360050103.

17. Mallick, J, Talukdar, S. Alsubih, M. Almesfer, M.K. Shahfahad, Hang, H.T. and Rahman, A. 2022. Integration of statistical models and ensemble machine learning algorithms (MLAs) for developing the novel hybrid groundwater potentiality models: a case study of semi-arid watershed in Saudi Arabia. Geocarto International, 37(22), 6442-6473. https://doi.org

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]

27. Shirani, K. 2013. Determining the thresholds of the most important effective factors and evaluating the sensitivity modeling of gully erosion in selected watersheds, Final report of the research project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 251 p. http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-818-en.html

28. Shirani, K. 2017. Modeling and evaluating the potential of land susceptibility to landslides using Shannon entropy probabilistic models and Bayesian weighted evidence (case study: Sarkhon-Karun basin). Soil and Water Sciences (formerly Agricultural Sciences and Technologies and Natural Resources) - Isfahan University of Technology, 21(1), 51-68.

29. Rajabi, A. Shabanlou, S. Yosefvand, F. and Kiani, A. 2021. Exploring the sample size and replications scenarios effect on spatial prediction of flood, using MARS and MaxEnt methods case study: saliantape catchment, Golestan, Iran. Natural Hazards, 109(1). https://doi.org/10.1007/s11069-021-04860-0

30. Zabihi, M. Pourghasemi, H.R. Pourtaghi, Z.S. and Behzadfar, M. 2016. GIS-based multivariate adaptive regression spline and random forest models for groundwater potential mapping in Iran. Environmental Earth Sciences, 75, 1-19. DOI 10.1007/s12665-016-5424-9.

31.Yousefi Mobarhan, E. and Shirani, K. 2019. Evaluation of the efficiency of the maximum irregularity model in identifying the factors affecting gully erosion and determining sensitive zones in the Alaa Semnan watershed. Journal of Watershed Management, 14(28), 37-54. http://dx.doi.org/10.61186/jwmr.14.28.37

[Downloaded from jwmsei.ir on 2025-12-08]

[DOI: 10.22034.19.69.2]