



Evaluation of Alborz Province Hard Rocks Using APLRFW Model and Fuzzy Method to Determine Areas Prone to Exploitation of Groundwater Resources

Amir Saberinasr¹ | Majid Dashti Barmaki² Akbar Khedri³

1. Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Expert of Fannavar Tarh Jame Consulting Engineers, Tehran, Iran.

3. Director of Kusar Dam, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Regional Water Authority, Yasuj, Iran.

✉Corresponding Author: A.saberinasr@scu.ac.ir

Received:
15 December 2025

Accepted:
09 February 2025

Published:
19 March 2025

Keywords:

Alborz province,
Groundwater Potential,
APLRFW model,
Hardrock Formation,
Fuzzy.

Extended abstract

Introduction

Sustainable water resource management in arid regions such as Iran is heavily reliant on groundwater. Declining precipitation, recurring droughts, and inadequate water management have placed significant pressure on these resources. The rapid urbanization and population growth in Alborz Province have exacerbated challenges related to drinking water supply.

Given the extensive exploitation of surface and alluvial water sources, identifying new resources in hard rock formations is essential. The integration of remote sensing and field data using Geographic Information Systems (GIS) and multi-criteria decision-making (MCDM) methods, such as Fuzzy-AHP, provides a powerful tool for groundwater potential assessment (Khedri et al., 2014; Dashti-Barmaki et al., 2015). Both global and local studies have demonstrated that these methods, especially in hard rock areas, offer high accuracy in locating groundwater resources. The combination of GIS and remote sensing (RS) with decision-making models can help identify suitable areas for groundwater exploitation.

Cite this article: Saberinasr, A., Dashti Barmaki, M. & Khedri, A. (2025). Evaluation of Alborz Province Hard Rocks Using APLRFW Model and Fuzzy Method to Determine Areas Prone to Exploitation of Groundwater Resources. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (2), 19-40. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8583.1085>.



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

This study aims to determine groundwater potential zones in Alborz Province through fuzzy and hierarchical analysis methods. The findings could aid in water resource management and reduce the costs associated with exploration and exploitation.

Materials and Methods

Alborz Province is geologically located within the Central Iran and Alborz structural zones, encompassing a variety of formations ranging from Precambrian to Quaternary. Elevations in the region vary from 1,079 to 4,190 meters, with precipitation levels ranging from 221 mm in the southern areas to 1,542 mm in the northern regions.

In this study, geological and topographic maps, precipitation data, synoptic station records, and Landsat ETM⁺ satellite images (year 2000) were used to analyze groundwater resources in Alborz Province. Data processing was performed using ERDAS 9.1, ArcGIS 9.3, ArcView 3.3, and ILWIS 3.4 software. The research process was carried out in four stages: data collection, image processing, digitization, and spatial analysis. After performing geometric and radiometric corrections to the images, geological, drainage, and fault data were extracted. Key layers, including lithology, slope, fault density, drainage density, precipitation, and elevation, were extracted and stored in a GIS database. These information layers were prepared as follows:

- Lithology was derived from 1:100,000-scale maps and satellite images.
- Elevation was extracted from the Digital Elevation Model (DEM).
- Precipitation was based on the precipitation-elevation relationship.
- Slope was calculated from the DEM through spatial analysis.
- Drainage density was obtained through density analysis.
- Fault density was derived from geological maps and satellite images.

In the ranking phase, the Rank Sum, Rank Reciprocal, and Rank Exponent methods were applied for weighting (Malczewski, 1999). Spatial analyses were conducted on these layers, and the final groundwater potential map was generated by integrating data using fuzzy operators, fuzzy inverse operator (AND), and the weighted AHP method. The APLRFW model was introduced and validated with geophysical data and spring information from the region.

Results and Discussion

This study, aimed at evaluating groundwater potential in the hard formations of Alborz Province, collected a range of environmental data and processed them within a GIS environment. Key factors, including lithology, fault density, precipitation, elevation, slope, and drainage density, were identified, and the relevant criterion maps were prepared. All data were transferred to the UTM coordinate system and referenced to WGS 84, standardizing them in a digital model.

For lithology assessment, rock units were classified based on their groundwater potential. Carbonate units, such as the Mobarak and Lar formations, which possess high water-bearing capacity, were identified as areas with high potential. In contrast, non-carbonate formations, such as gypsum and marl, were classified as low-potential areas due to their negative impact on water quality. Elevation and precipitation maps were standardized using linear functions, demonstrating a direct relationship between these two factors.

The slope in the region varies from 0 to 57 degrees and was standardized using decreasing linear functions. Fault and drainage density analyses indicated that major faults have an east-west trend, aligning with the general structure of the Alborz mountain range. Finally, vector-to-raster conversion and fuzzy GIS functions were used to create the final maps.

The final groundwater potential map revealed that only 21% of the area has good or very good potential for groundwater extraction. Additionally, 29%, 20%, and 30% of the hard formations were classified as having very weak, weak, and moderate groundwater potential, respectively. This study focused only on areas with high potential for groundwater exploitation. Therefore, further studies, such as

borehole drilling and geophysical investigations, are necessary to verify the areas with the highest groundwater potential. The results provide an effective model for groundwater potential mapping in this region, which can be utilized for water resource management and planning in Alborz Province.

Conclusion

By integrating remote sensing, GIS, and the Fuzzy AHP method, this study identified areas with high groundwater potential in the hard formations of Alborz Province. The results indicated that lithology (0.26) and precipitation (0.20) are the most influential factors, while drainage density (0.10) and elevation (0.13) are of lesser importance. The northern Tehran-Karaj area, the Taleqan-Alamut border with Hashtgerd, and northern Qazvin were identified as areas with the highest groundwater potential. Limitations of the study included incomplete access to hydrogeological data and the scale of available maps. Future research should include the use of spring hydrographs and climate change assessments for further validation.



ارزیابی سازندهای سخت استان البرز با استفاده از مدل APLRFW و روش فازی برای تعیین مناطق مستعد بهره‌برداری از آب زیرزمینی

امیر صابری نصر^۱ | مجید دشتی برمکی^۲ | اکبر خدري^۳

۱. استادیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲. کارشناس شرکت مهندسی مشاور فناوران طرح جامع، تهران، ایران.

۳. مدیر سد کوثر، شرکت آب منطقه‌ای کهگیلویه و بویر احمد، یاسوج، ایران.

✉ نویسنده مسئول: A.saberinasr@scu.ac.ir

چکیده

شناسایی و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت به‌عنوان یکی از گزینه‌های اصلی تأمین آب برای مناطق مختلف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، این تحقیق با هدف پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت شمال استان البرز و ارزیابی امکان‌سنجی بهره‌برداری از این منابع با توجه به ملاحظات اجتماعی و زیست‌محیطی انجام گرفته است. محدوده مطالعاتی مشتمل بر مساحت سازندهای سخت استان البرز با مساحتی برابر با ۳۰۱۱/۵ کیلومترمربع می‌باشد. در پژوهش پیش رو، ابتدا داده‌های مربوط به لایه‌های لیتولوژی، شیب، تراکم آبراهه، ارتفاع، تراکم گسل و بارش منطقه استخراج شدند. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (AHP) و عملگر عطفی فازی (AND)، به این داده‌ها وزن‌دهی و مدل APLRFW برای شبیه‌سازی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در منطقه طراحی گردید. نتایج نشان می‌دهند که بالاترین پتانسیل منابع آب زیرزمینی در نواحی میانی شمال استان، شامل مرز مشترک بخش‌های تهران-کرج و قسمت‌های شمالی قزوین با ۲۱ درصد از مساحت کل منطقه، معادل ۶۳۲/۴۱ کیلومترمربع، قرار دارد. در مقابل، بخش‌های جنوبی منطقه که آبدهی مناسب دارند، به دلیل وجود سازند قرمز بالایی که موجب کاهش کیفیت آب می‌شود، برای بهره‌برداری توصیه نمی‌شوند. جهت صحت‌سنجی مدل، از لایه‌های رستری چشمه‌ها و داده‌های ژئوفیزیکی استفاده شد که هم‌خوانی خوبی با مدل نهایی داشتند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:

استان البرز،

پتانسیل آب زیرزمینی،

مدل APLRFW

سازند سخت،

فازی.

مقدمه

در مناطق خشک نظیر کشور ایران، مدیریت پایدار آب به شدت به منابع آب زیرزمینی وابسته است. در دهه‌های اخیر، خشک‌سالی، کاهش بارندگی و حتی گاهاً مدیریت نادرست منابع آبی (مردم و مسئولین)، آثار مخربی بر منابع آب سطحی، زیرزمینی و اکوسیستم‌های طبیعی داشته است. علاوه بر این، گسترش شهرنشینی و مهاجرت از مناطق خشک و حاشیه کشور به دلیل مشکلات و مسائل اجتماعی و سیاسی به سمت پایتخت رو به فزونی نهاده و موجب افزایش تمرکز جمعیت در شهرهای اطراف تهران، به‌ویژه کرج و سایر شهرهای استان البرز شده است. در کنار این مسائل، تغییر سیاست‌های جمعیتی و پیش‌بینی افزایش جمعیت در افق ۱۴۲۵ تأمین آب شرب درازمدت استان البرز و شهرک‌های اطراف آن را به یکی از دغدغه‌های مهم شرکت آب منطقه‌ای تبدیل کرده است. در حال حاضر کلیه منابع آب سطحی استان شناسایی و مهار شده و منابع آبرفتی آب زیرزمینی استان به‌نحو فزاینده‌ای مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. لذا از نظر مباحث مدیریتی، شناسایی منابع مهم تغذیه آب در سازندهای سخت، چه به‌منظور جلوگیری از حفاری‌های اضافی پیرامون آن‌ها و رعایت حریم کمی و کیفی آن‌ها و چه به‌عنوان پتانسیل منابع آب جدید امری ضروری می‌باشد. یکی از این منابع مهم در استان البرز، منابع آب موجود در سازندهای سخت شمال استان می‌باشد. تلفیق اطلاعات دورسنجی و داده‌های زمینی به‌ویژه در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی می‌تواند، نتایج ارزشمندی دربر داشته باشد. نرم‌افزارهای RS و GIS با مزیت‌های مکانی، طیفی و قابلیت‌های زمانی، مهارت پوشش وسیع داده‌ها و دستیابی به مناطق صعب‌العبور در یک زمان کوتاه، از ابزارهایی می‌باشند که نسبت به ابزارهای دستی دارای کاربردها و توانایی‌های بیشتری هستند. به همین دلایل استفاده از روش‌های دورسنجی در مطالعات سازندهای سخت همواره مورد توجه بوده است. محققین مختلفی در جهان (El-Naqa and et al., (2009)، Hsin-fu and et al., (2012)، Hammouri and et al., (2008)، Subba Rao and Prasad and et al., (2007)، (Sener and et al., (2005 et al., (2001) و ایران (Khedri et al., 2011; Kedri et al, 2014, Dashti-

... (armaki et al, 2015; and از تلفیق فنون سنجش‌ازدور و GIS در تحقیقات و مدیریت آب‌های زیرزمینی استفاده نموده‌اند. استفاده از تکنیک‌های مذکور در کنار روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) نظیر روش سلسله‌مراتبی فازی به بهبود فرآیند تصمیم‌گیری مکانی کمک زیادی می‌نماید. در روش‌های مرسوم، از مجموعه‌های قطعی برای وزن‌دهی، طبقه‌بندی و هم‌پوشانی معیارهای مختلف در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده می‌کنند. یکی از مشکلات تصمیم‌گیری با استفاده از این روش‌ها، روبه‌رو شدن با انواع عدم قطعیت‌ها در همه مراحل از برداشت داده تا بررسی و تحلیل نتایج می‌باشد. از سوی دیگر، حدود تعیین‌شده توسط هر یک از کارشناسان و یا سازمان‌های متولی در طبقه‌بندی هر معیار و اثر آن در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی دارای عدم قطعیت‌هایی می‌باشند، زیرا این مقادیر از برون‌یابی داده‌های آزمایش‌ها یا تجربیات میدانی که از مطالعات موردی انجام شده است به‌دست آمده‌اند. در سال‌های اخیر، توانایی روش‌های مبتنی بر منطق فازی در لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها در مسائل مختلف زیست‌محیطی به اثبات رسیده است. در سالیان اخیر، مطالعات زیادی از تلفیق روش‌های بیان‌شده در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی انجام شده است (Soori et al, Bhadrar (2017; Azareh, 2023). در جدیدترین مطالعات و همکاران (۲۰۲۲) از FAHP (تحلیل سلسله‌مراتبی - فازی) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی حوضه کاروانور (Karuvannur) هند پرداختند. در این مطالعه از معیارهایی نظیر زمین‌ریخت‌شناسی، شیب، زمین‌شناسی، تراکم آبراهه، تراکم خطواره و کاربری زمین استفاده شد. نقشه‌نمایی ارزیابی آب زیرزمینی به چهار دسته بسیار خوب (با مساحت ۴۸/۱٪)، خوب (با مساحت ۱۲/۷٪)، متوسط (با مساحت ۱۸/۳٪) و ضعیف (با مساحت ۲۰/۹٪) طبقه‌بندی شد. همچنین، Shekar and Mathew (۲۰۲۳)، از تلفیق روش‌های مبتنی بر GIS، RS و MCDM به مطالعه پتانسیل آب زیرزمینی حوضه مورد (Murredu) در هند و تعیین نقاط مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی در آن حوضه پرداختند. در این مطالعه آن‌ها با توجه به اطلاعات موجود از معیارهای شیب، تراکم آبراهه، ژئومورفولوژی،

پتانسیل‌یابی و همچنین مکان‌یابی از طریق تلفیق مجموعه عوامل و پارامترهای مؤثر در پیشرفت کارست صورت می‌گیرد و در نهایت محدوده‌هایی که با پتانسیل کارست‌شدگی معرفی می‌گردد، شامل مکان‌هایی است که شرایط و پارامترهای مؤثر جهت ایجاد مخازن آب زیرزمینی را دارا می‌باشد. می‌توان محدوده‌های مذکور را جهت انجام مطالعات دقیق‌تری همچون عملیات ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی، جهت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه، مورد پیشنهاد و استفاده قرار داد. در واقع به‌علت هزینه زیاد و زمان‌بر بودن مطالعات ژئوفیزیکی و حفاری چاه‌های اکتشافی، لازم است ابتدا به روش‌های سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر مانند پتانسیل‌یابی، مناطق توسعه‌یافته کارستی توسط ابزارهای RS و GIS مشخص شده و چنین محدوده‌های جهت انجام مطالعات تفصیلی معرفی گردد. بنابراین، هدف از این مطالعه، شناسایی مناطق مستعد بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در استان البرز با استفاده از تکنیک‌های مذکور و تلفیق آن با روش فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی می‌باشد تا جهت مطالعات تکمیلی در اختیار مدیران و مسئولین امر قرار گیرد. نتایج حاصل از این مطالعه مدیریت و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب زیرزمینی را تسهیل می‌کند و می‌تواند در دسترس بودن و پایداری آن‌ها را برای نسل‌های آینده تضمین نماید.

داده‌ها و روش‌ها

در این مطالعه نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰/۰۰۰)، نقشه‌های توپوگرافی (مقیاس ۱:۲۵/۰۰۰)، آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک و همچنین تصاویر سنجنده لندست ETM سال ۲۰۰۰ مربوط به منطقه مورد مطالعه تهیه و از نرم‌افزارهای Arc gis 9.3، Erdas 9.1، Arc View 3.3 و ILWIS version 3.4 برای استخراج لایه‌ها استفاده شد. مطالعه طی ۴ مرحله اساسی شامل: جمع‌آوری، پردازش تصاویر ماهواره‌ای، رقومی‌سازی داده‌ها و تحلیل‌های مکانی انجام یافت. پس از انجام تحلیل‌هایی همچون تصحیح ژئومتریک و رادیومتریک، طبقه‌بندی و فیلتر کردن بر روی داده‌های ماهواره‌ای، بر روی این تصاویر تفسیرهایی برای استخراج زمین‌شناسی منطقه، آبراهه‌ها و خطواره‌ها انجام گردید. در نرم‌افزار GIS پایگاه

پوشش زمین و کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی، بارش، خاک، فاصله از رودخانه و ارتفاع استفاده کردند. پتانسیل آب زیرزمینی به سه دسته پتانسیل کم، متوسط و بالا تقسیم شد. نتایج نهایی بر اساس مدل تلفیقی فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که ۱۴/۰۲ درصد از مساحت حوضه دارای پتانسیل کم، ۷۶/۵۵ درصد مساحت حوضه دارای پتانسیل متوسط و ۹/۴۴ درصد دارای پتانسیل بالای آب زیرزمینی است. Ally و همکاران (۲۰۲۴) نیز از تلفیق همین روش‌ها برای مطالعه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه Mpwapwa تانزانیا استفاده کردند. آن‌ها در این تحقیق هفت لایه شامل لیتولوژی، خاک، تراکم آبراهه، شیب، ارتفاع، خطواره و شدت مغناطیسی را به کار بردند. نقشه پتانسیل نهایی آب زیرزمینی در این مطالعه نشان داد که ۱۹٪، ۳۱٪، ۲۸٪ و ۲۲٪ از منطقه به ترتیب به عنوان مناطق بسیار خوب، خوب، متوسط، فقیر و بسیار فقیر طبقه‌بندی می‌شوند. در تمامی مطالعات فوق، تلفیق GIS و RS به عنوان ابزارهای مهم در کنار روش‌های تصمیم‌گیری چند متغیره، ترکیبی توانمند در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی معرفی شده است. از این رو و با توجه به مطالعات پیشین و بررسی‌های انجام شده در زمینه استفاده از تلفیق داده‌های دورسنجی و اطلاعات زمینی در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی، می‌توان نتیجه گرفت که این روش‌ها، به‌ویژه در کنار سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی و تحلیل منابع آب زیرزمینی در مناطقی با سازندهای سخت هستند. از آنجا که روش‌های مرسوم برای تصمیم‌گیری با استفاده از مجموعه‌های قطعی با چالش‌های عدم قطعیت مواجه می‌باشند، استفاده از منطق فازی به‌ویژه در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی به‌خوبی توانسته است این عدم قطعیت‌ها را در نظر بگیرد و دقت نتایج را افزایش دهد.

با توجه به تأسیس شرکت آب منطقه‌ای البرز در سال ۹۱، شناسایی سازندهای سخت استان البرز و پتانسیل آن‌ها در تأمین آب، تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته و لزوم توجه به این امر در مدیریت آبی منابع آب در این استان غیرقابل اجتناب است. به‌عبارتی دیگر، مطالعه این منابع طبیعی به‌منظور حفاظت، برنامه‌ریزی و تعیین مقررات و ضوابطی برای استفاده بهینه از آن‌ها ضروری است.

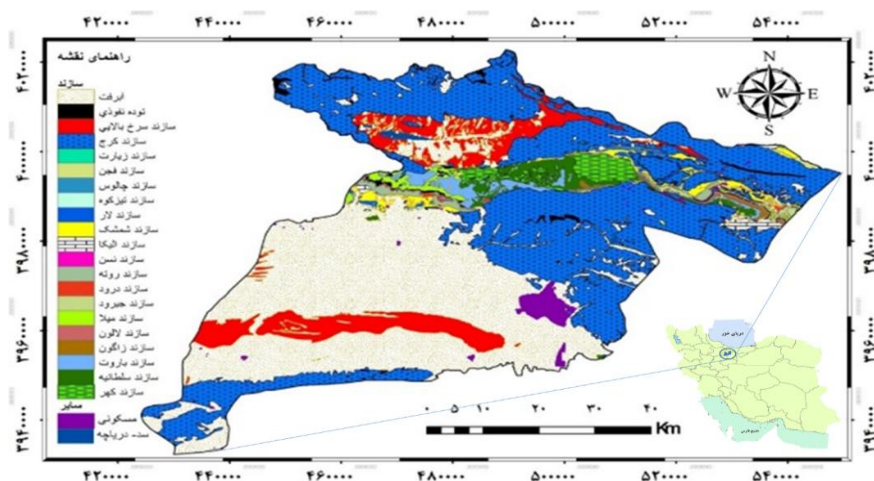
بوده و در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و در طول ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی واقع شده است. مساحت این استان برابر $۵۰۹۸/۴$ کیلومترمربع است که سدهم درصد از مساحت کل کشور را پوشش می‌دهد. بررسی نقشه‌های توپوگرافی استان نشان می‌دهد که دامنه منحنی‌های توپوگرافی استان از ۴۱۹۰ متر در ارتفاعات شمالی استان تا ۱۰۷۹ متر در مناطق پست جنوبی استان متغیر می‌باشد. ارتفاع متوسط استان به ۱۹۲۸ متر و شیب متوسط استان در حدود ۲۴ درصد برآورد می‌گردد. بارندگی این محدوده بین ۲۲۱ میلی‌متر در نواحی جنوبی تا ۱۵۴۲ میلی‌متر در نواحی شمالی (طبق رابطه برازش داده شده) متغیر می‌باشد. میانگین دمای متوسط سالانه $۱۱/۳۹$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

داده مورد نیاز ساخته شد و با رقومی کردن نقشه‌های موجود، لایه‌های مؤثر در تغذیه آب زیرزمینی شامل: لیتولوژی، شیب، تراکم گسل‌ها، تراکم آبراهه، بارش و ارتفاع استخراج گردید. در ادامه، تحلیل‌های فضایی بر روی لایه‌ها انجام شد و برای استخراج نقشه نهایی مناطق مستعد بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، این لایه‌ها با توجه به عملکرد فازی و سلسله مراتب زوجی وزن‌دار، تلفیق و مدل شدند. مدل ارائه شده با نام APLRFW جهت پتانسیل آب زیرزمینی مناطق سخت معرفی می‌گردد. در نهایت مدل به دست آمده با اطلاعات ژئوفیزیک، محل و دبی چشمه‌های مهم صحت‌سنجی گردید.

وضعیت عمومی، زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی

منطقه مورد مطالعه

در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. استان البرز سی و یکمین استان ایران



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی استان البرز.

Fig 1. Geological map and Geographical location of Alborz province.

می‌رسد و سازند کرج به همراه نهشته‌ها و پادگانه‌های آبرفتی کهن و جوان کواترنری، گسترده‌ترین واحدهای منطقه می‌باشد (Aghanabati, 2004). واحدهای گوناگون سنگی منطقه، به ترتیب از قدیم به جدید، شامل سازندهای کهر و سلطانیه مربوط به دوره پرکامبرین، سازندهای باروت، زاگون، لالون، میلا، دورود، روته و نسن مربوط به دوران پالئوزوئیک، سازندهای شمشک، الیکا، لار، تیزکوه و چالوس مربوط به دوران مزوزوئیک، سازندهای

این استان از نظر تقسیمات زمین‌شناسی ایران و از دیدگاه ساختاری طبق تقسیم‌بندی اشتوکلین و بربریان در پهنه ایران مرکزی و البرز جای گرفته است. بر اساس این تقسیم‌بندی در نواحی جنوبی استان نهشته‌های تخریبی-تبخیری سنوزوئیک ایران مرکزی با پوشش نهشته‌های کواترنری و در نواحی شمال و شمال خاوری واحدهای آتشفشانی، آذرآواری، رسوبی و آذرین گسلیده و چین‌خورده البرز برون‌زد دارد. قدمت کهن‌ترین سنگ‌های منطقه به ماسه‌سنگ و شیل پرکامبرین سازند کهر

فجن، زیارت، کرج و قمرز بالایی مربوط به دوران سنوزوئیک و آبرفت‌ها مربوط به کواترنری می‌باشد.

معرفی لایه‌های اطلاعاتی و تهیه داده

همان‌گونه که بیان شد، لایه‌های مؤثر در تغذیه آب زیرزمینی شامل لیتولوژی، شیب، تراکم گسل‌ها، تراکم آبراهه، بارش و ارتفاع هستند که در اینجا به معرفی هر لایه و روش تهیه آن پرداخته شده است:

لایه لیتولوژی: نظر به اینکه هدف مطالعه تعیین مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی در سازندهای سخت می‌باشد، نوع لیتولوژی می‌تواند تعیین‌کننده باشد. این لایه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در نرم‌افزار ArcGIS تهیه و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat ETM⁺ 8 تدقیق گردید. ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی موجود زمین مرجع شده، سپس سازندهای مختلف بر روی تصویر و نقشه شناسایی شد و با رقومی کردن مرز سازندها و تدقیق با تصاویر ماهواره‌ای، برای این نقشه یک پایگاه داده مکانی (ژئودیتابیس) تهیه گردید. البته، جهت تبدیل آن به یک نقشه معیار می‌بایست تأثیر آن در هدف که پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی بود، مشخص می‌شد.

با توجه به اینکه هدف مطالعه، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت استان البرز است نقشه پایه هدف لیتولوژیکی (L_b) با تابع بولین (۰ و ۱) برای بخش سازند سخت (ضریب ۱) و بخش آبرفتی (ضریب ۰) تهیه گردید. در نتیجه تمامی نقشه‌های ایجادشده در مراحل مختلف در نقشه پایه بولین ضرب می‌شوند. در گام بعدی، با توجه به تنوع سازندها و وسعت منطقه، سازندها به گروه‌های مختلف زیر دسته‌بندی شدند.

ارتفاع: یک مؤلفه مستقل و مؤلفه وابسته به آن را می‌توان ارتفاع و میزان بارش رخ داده دانست. در خصوص متغیر مستقل ارتفاع، شرایط به‌نجوی است که در ارتفاعات بالاتر بخش عمده‌ای از بارش به‌صورت رواناب درآمده، لذا فرصت کافی جهت نفوذ آب به درون زمین وجود ندارد بنابراین ارتفاعات بالاتر از پتانسیل آب زیرزمینی کمتری برخوردار است. این لایه به‌نوعی لایه اقتصادی یا دسترسی به منطقه را نیز تحت پوشش قرار می‌دهد.

بارش: با توجه به اینکه ایستگاه‌های باران‌سنجی به‌طورمعمول، در دشت‌ها استقرار یافته‌اند و مطالعه معطوف به سازندهای سخت واقع در ارتفاعات است درون‌یابی مستقیم بارش با خطای هندسی بالایی مواجه خواهد بود و از این‌رو، نمی‌توان از این داده‌ها به‌طور مستقل استفاده کرد. در واقع بارش متغیری وابسته به ارتفاع خواهد بود. در مطالعات هیدرولوژی و هیدروژئولوژی، میزان بارندگی عامل اصلی رواناب سطحی، نفوذ، ورودی بیلان و ... می‌باشد. جهت تهیه نقشه پراکندگی بارش، رابطه بارش - ارتفاع برازش داده شده و با اعمال آن بر روی DEM منطقه نقشه نهایی به دست آورده شده است.

شیب: شیب عامل مهمی در شناسایی مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی می‌باشد. در نتیجه، شیب بیشتر، رواناب بیشتری جاری شده، لذا نرخ فرسایش بیشتر شده و نفوذ و به‌تبع آن تغذیه کمتری صورت می‌پذیرد (Magesh et al., 2012; Das and Pal, 2019). نقشه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و توسط تابع Spaial analysis به دست می‌آید.

تراکم آبراهه: شبکه زهکشی می‌تواند عامل تعیین‌کننده در پی‌جویی منابع آب زیرزمینی باشد. در این راستا، تراکم آبراهه ارتباط مستقیمی با میزان نفوذ طبیعی خاک و سنگ دارد و از پارامترهای بسیار مهم در مطالعات هیدروژئولوژیکی است. شبکه زهکشی و تراکم آن نشانه قابل‌توجهی از ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی یک منطقه است که وابستگی زیادی به اقلیم، راندمان نفوذ، سنگ‌شناسی، وضعیت پوشش گیاهی، ناهمواری‌های سطحی، شدت زهکشی و ... دارد. مطالعات نشان‌گر آن است که نوع شبکه زهکشی هر منطقه توسط لیتولوژی، توپوگرافی و ساختارهای تکتونیکی منطقه کنترل می‌شود. بر این اساس، آبراهه‌ها نقش انتقال رواناب را داشته و با نفوذپذیری زمین رابطه عکس دارند. یعنی، نواحی با رواناب سطحی بالا به‌دلیل نسبت تغذیه کم، پتانسیل آب زیرزمینی را کاهش می‌دهند. برای استخراج شبکه زهکشی منطقه و تعیین تراکم و رده آبراهه‌ها از DEM منطقه استفاده گردید. شدت زهکشی با استفاده از ابزار تجزیه و تحلیل چگالی در ArcGIS تولید شد. تراکم شبکه زهکشی با نزدیکی فاصله بین کانال‌های جریان تعریف می‌شود. تراکم زهکشی یک حوضه، کل طول شبکه

رودخانه تقسیم بر مساحت حوضه است که از طریق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$DND = \Sigma L/A \quad (۱)$$

که در این معادله DND تراکم شبکه زهکشی (تراکم آبراهه) و L طول کل آبراهه‌ها و A مساحت منطقه مورد مطالعه است.

تراکم گسل‌ها: از آنجایی که نقش گسل‌ها در تغذیه و هدایت آب زیرزمینی انکارناپذیر می‌باشد، لذا در این تحقیق برای تراکم گسل لایه جداگانه در نظر گرفته و بر حسب اهمیت، وزنی به آن اختصاص داده شد. شیپ‌فایل گسل‌ها به وسیله نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در نرم‌افزار ArcGIS تهیه و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 ETM+ تدقیق گردید.

روش رتبه‌بندی

ساده‌ترین روش اختصاص دادن وزن به معیارها، مرتب نمودن آن‌ها بر اساس نظر تصمیم‌گیرنده می‌باشد. مرتب نمودن معیارها می‌تواند به صورت مستقیم (مهم‌ترین معیار = ۱، دومین معیار = ۲ و غیره) یا معکوس (کم‌اهمیت‌ترین معیار = ۱ و غیره) انجام گیرد. پس از مرتب نمودن معیارها باید وزن‌های عددی را محاسبه نمود. برای انجام این کار می‌توان از روش‌های Rank sum، Rank reciprocal و Rank exponent استفاده نمود (Malczewski, 1999). در این روش‌ها لازم است تصمیم‌گیرنده وزن معیارها را بر اساس یک مقیاس از پیش تعیین شده تخمین بزند. امتیاز بیشتر برای یک معیار نشان‌دهنده اهمیت نسبی بالاتر آن معیار در مقایسه با سایر معیارها است. در این مورد، از نرم‌افزار کاربردی EXPERT CHOICE استفاده می‌شود.

روش وزن‌دهی مقایسه زوجی، بخشی از روش AHP می‌باشد که در سال ۱۹۸۰ توسط Saaty طرح گردیده است. روش AHP، یکی از تکنیک‌های کارآمد در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره می‌باشد. در روش وزن‌دهی مقایسه زوجی، معیارها دو به دو با یکدیگر مقایسه شده و اهمیت آن‌ها نسبت به یکدیگر تعیین می‌گردد. سپس یک

ماتریس ایجاد می‌شود که ورودی آن همان وزن‌های تعیین‌شده و خروجی آن وزن‌های نسبی مربوط به معیارها است (Pourakbari et al., 2020). در این تحقیق برای وزن‌دهی معیارها از این روش استفاده گردیده است. در این روش ابتدا سلسله‌مراتب مقایسه‌ها ساخته می‌شود که در بالاترین بخش هدف که در اینجا انتخاب مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی است و بعد از آن پارامترهای مؤثر در تصمیم‌گیری است. سپس پارامترها در این مرحله به روش دو به دو با یکدیگر مقایسه شده، امتیازدهی می‌شوند. نحوه مقایسه گزینه‌ها و امتیازدهی به آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. در این مرحله گزینه‌های مختلف بر اساس نظرات کارشناسی و مطالعات پیشین، با یکدیگر مقایسه می‌شوند این مقایسه‌ها با نظرات تعدادی از متخصصان که در این زمینه فعالیت دارند مقایسه شده و نتیجه حاصل در نرم‌افزار تحلیلی قرار داده می‌شود. سپس ماتریس حاصل از مقایسه تمام گزینه‌ها را تشکیل داده و زیر مؤلفه‌های آن نرمال می‌شود، پس از محاسبه ماتریس نرمال، ماتریس وزن هر کدام از گزینه‌ها محاسبه می‌شود، در صورتی که شاخص سازگاری (همانند این مطالعه) بیش از ۰.۹٪ باشد و به عبارت دیگر ناسازگاری محاسبات کمتر از ده درصد باشد محاسبات مورد تأیید قرار می‌گیرد، در غیر این صورت تحلیل باید مجدداً صورت گیرد. نرخ سازگاری (CR) از تقسیم شاخص سازگاری (CI) بر شاخص تصادفی (RI) و به صورت زیر (معادله ۱) به دست می‌آید (Shao et al., 2020).

$$CR = CI/RI \quad (۲)$$

شاخص سازگاری نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$CI = \lambda_{max} - n/n-1 \quad (۳)$$

که در این معادله λ عنصر بردار ویژه و n تعداد معیارهاست. مقدار λ_{max} نیز از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_{max} = \frac{\text{ستون وزن‌ها} * \text{سطر ماتریس ارزش‌گذاری}}{\text{وزن معیار}} \quad (۴)$$

جدول ۱. نحوه مقایسه گزینه‌ها و امتیازدهی به آن‌ها

Table 1. The scale of pairwise comparison and scoring them

مقدار عددی Value	Priorities (Oral judgment)	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
9	(Entremely preferred)	کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر
7	(Very strongly preferred)	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی
5	(Strongly preferred)	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی
3	(Moderately preferred)	کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر
1	(Equally preferred)	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان
2,4,6,8	(Preferences between the above intervals)	ترجیحات بین فواصل فوق

روش تلفیق فازی

پس از تهیه نقشه‌های زیرمعیارهای مختلف مدل فازی لازم است تلفیق نقشه‌ها با استفاده از عملگرهای فازی انجام گیرد. انتخاب عملگرهای فازی مناسب جهت تلفیق لایه‌های مختلف با توجه به ارتباط و برهمکنش عوامل مربوط به آن لایه‌ها انجام می‌گیرد. عملگرهای فازی چندین مجموعه فازی را برای به دست آوردن یک مجموعه فازی، به روش دلخواه ترکیب می‌کنند. تحقیقات متعددی درباره عملگرهای تلفیقی فازی وجود دارد (Yager, 1991; Combettes, 1993; Trillas et al., 1983; Dubois & Prade, 1985; Yager & Kelman, 1996; Yager, 1997). در نرم‌افزار GIS نیز عملگرهای فازی مختلفی وجود دارد، اما در این تحقیق از عملگر عطفی فازی (AND) استفاده شده است. برای ممانعت از افزایش حجم مقاله تنها به توضیح این عملگر پرداخته خواهد شد. این عملگر در مطالعات زیادی به عنوان عملگر مطلوب در تلفیق نقشه‌های نهایی مکان‌یابی گزارش شده است (Nikzad et al., 2017; Mahdavi and Akhavan, 2018). این عملگر مشابه اشتراک در مجموعه‌های کلاسیک می‌باشد و زمانی استفاده می‌شود که دو یا چند معیار با هم می‌توانند به حل یک مسئله کمک کنند و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\text{combrinatio}} = \min(\mu_A, \mu_B, \dots) \quad (5)$$

عملگر مذکور، در یک موقعیت مشخص، حداقل درجه عضویت پیکسل‌ها در نقشه مورد تلفیق را برای نقشه‌های

نهایی در نظر می‌گیرد که منجر به یک نتیجه محافظه‌کارانه شده و از وزن‌های بالای پیکسل‌ها کاملاً چشم‌پوشی می‌شود. این عملگر، در مواقعی که دو یا چند عامل برای اثبات یک فرضیه بایستی با هم وجود داشته باشند، مناسب است (Ehsanifar et al., 2021).

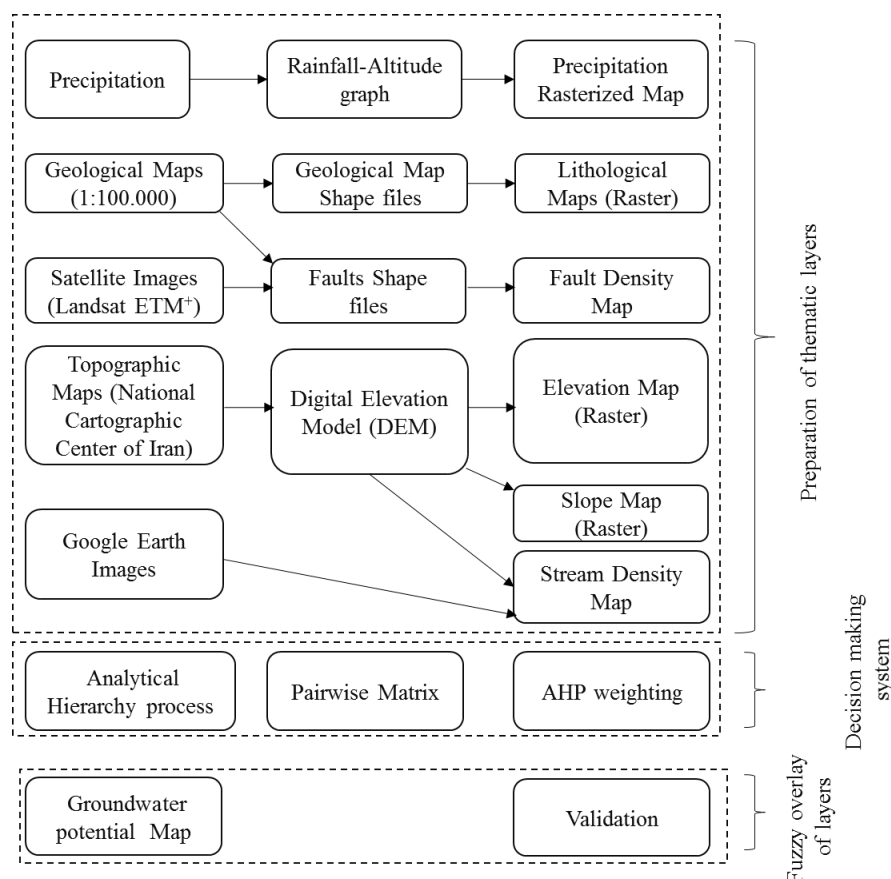
یافته‌ها و نتایج

تهیه لایه‌های اطلاعاتی و اجرای مدل مورد نظر

به منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت استان البرز مراحل تعیین عوامل مؤثر، تهیه نقشه‌های معیار، هم‌مقیاس‌سازی نقشه‌های معیار، وزن‌دهی و تلفیق در محیط GIS انجام شده است. شماتیکی از روند انجام این مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است تحقیق حاضر در نهایت منجر به ارائه یک مدل مناسب برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در استان البرز گردیده است.

داده‌های مورد نیاز برای تهیه نقشه‌های معیار از منابع مختلف (نظیر سازمان هواشناسی، سازمان زمین‌شناسی، سازمان نقشه‌برداری، تصاویر هوایی و...) و با فرمت‌های گوناگون جمع‌آوری شده است. داده‌های صحرایی و نقشه‌های مورد نیاز رقومی‌سازی شده و سپس به محیط GIS آورده شده‌اند.

سپس تمامی داده‌ها به یک سیستم تصویر (UTM) و یک سیستم مرجع (WGS 84) منتقل شدند. سپس تمامی داده‌ها به یک سیستم تصویر (UTM) و یک سیستم مرجع (WGS 84) منتقل شدند.



شکل ۲. نمودار مراحل پتانسیل یابی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه.

Fig 2. Flow Chart of The Stages For Evaluating Groundwater Potential in The Study Area.

مهم ترین عوامل مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت منطقه مورد مطالعه عبارتند از: لیتولوژی، تراکم گسل، بارش، ارتفاع، شیب و تراکم آبراهه. با استفاده از این عوامل و همچنین توابع تحلیلی مکانی مختلف اعمال شده بر روی داده ها (نظیر یکی کردن، بریدن، ادغام کردن، فاصله، تراکم، طبقه بندی، طبقه بندی مجدد و توابع تحلیلی سطوح مانند استخراج شیب و ایجاد

سطح)، این داده ها و عوامل به نقشه های معیار تبدیل شدند. ارزش کلاس های اعمال شده برای هر یک از لایه های مؤثر در توسعه آب زیرزمینی در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به پراکندگی داده ها و همچنین دقت تصمیم گیری اندازه ی پیکسلی ۵۰×۵۰ متر برای همه ی نقشه ها انتخاب شد. در ادامه نحوه تهیه لایه ها و نقشه های معیار مذکور ارائه شده است.

جدول ۲. ارزش کلاس های اعمال شده برای لایه های مؤثر در توسعه آب زیرزمینی

Table 2. The Value of Applied Classes for Effective Layers in The Development of Groundwater

پارامتر		پارامتر	
Parameter		Parameter	
ارزش	ارتفاع (متر)	ارزش	بارش (میلی متر)
Value	Altitude (meter)	Value	Precipitation (millimeter)
۹	۳۸۵۰-۴۱۹۰	۹	۱۳۶۰-۱۵۰۵
۸	۳۵۱۰-۳۸۵۰	۸	۱۲۱۵-۱۳۶۰
۷	۳۱۷۰-۳۵۱۰	۷	۱۰۷۰-۱۲۱۵
۶	۲۸۳۰-۳۱۷۰	۶	۹۲۵-۱۰۷۰
۵	۲۴۹۰-۲۸۳۰	۵	۷۸۰-۹۲۵

۴	۲۱۵۰-۲۴۹۰	۴	۶۳۵-۷۸۰
۳	۱۸۱۰-۲۱۵۰	۳	۴۹۰-۶۳۵
۲	۱۴۷۰-۱۸۱۰	۲	۳۴۵-۴۹۰
۱	۱۱۳۴-۱۴۷۰	۱	۲۰۴-۳۴۵
ارزش Value	تراکم گسل (درصد) Fault Density (%)	ارزش Value	تراکم آبراهه (درصد) Stream Density (%)
۳	۰ - ۲۵	۳	۰ - ۲۵
۵	۲۵ - ۵۰	۵	۲۵ - ۵۰
۷	۵۰ - ۷۵	۷	۵۰ - ۷۵
۹	۷۵ - ۱۰۰	۹	۷۵ - ۱۰۰
ارزش Value	لیتولوژی Lithology	ارزش Value	شیب (درجه) Slope (Degree)
۹	واحدهای سنگی کربناته با پتانسیل آبی خوب	۹	۰ - ۱۲/۵
۷	واحدهای سنگی کربناته با پتانسیل آبی نسبتاً خوب	۸	۱۲/۵ - ۲۵
۵	واحدهای سنگی کربناته با پتانسیل آبی متوسط	۷	۲۵ - ۳۷/۵
۳	واحدهای سنگی غیرکربناته با پتانسیل آبی کم	۶	۳۷/۵ - ۵۰
۱	واحدهای سنگی غیرکربناته فاقد پتانسیل آبی و مخرب کیفیت آب	۵	۵۰ - ۶۲/۵
۰	آبرفت	۴	۶۲/۵ - ۷۵

رأسی، میلا (ممبر پنجم)، لشکرک، جیرود (واحدهای Djv و Dja) مبارک (بخش مارنی پایین) درود، روته (بخش مارنی پایینی) نسن، الیکا (بخش پایینی)، پالند، شمشک، دلیچای، ژپیس و ملافیر ژوراسیک و کرتاسه (واحدهای Km و Jm) فجن (واحد PEfc) ممبرهای مختلف سازند کرج و واحدهای Pdv, Pv, Pev, Jqc, K1v, K2s, K2b, E6ta, Etr, Etm, E2sm, Emt, Em, Eml, Eomt, Eoms, Mms, Qba, Qta, Qlv, K1c, K2c, K2di, Ev, Ekv, M2, M3, M, Mcs, Msm کنگلومرای هزاردره و همچنین اکثر واحدهای آذرین متعلق به ائوسن، بعد از ائوسن و الیگوسن جزء این گروه می‌باشند.

واحدهای سنگی غیرکربناته فاقد پتانسیل آبی و تخریب‌کننده کیفیت: لیتولوژی این واحدها ملافیر، ژپیس، انیدریت، دیاباز آلتره شده و مارن‌های انحلال‌پذیر می‌باشد. از واحدهای این گروه می‌توان به بخش‌های ژپسی سازندهای فجن، کند و واحدهای Mms و M1, Kgy اشاره کرد.

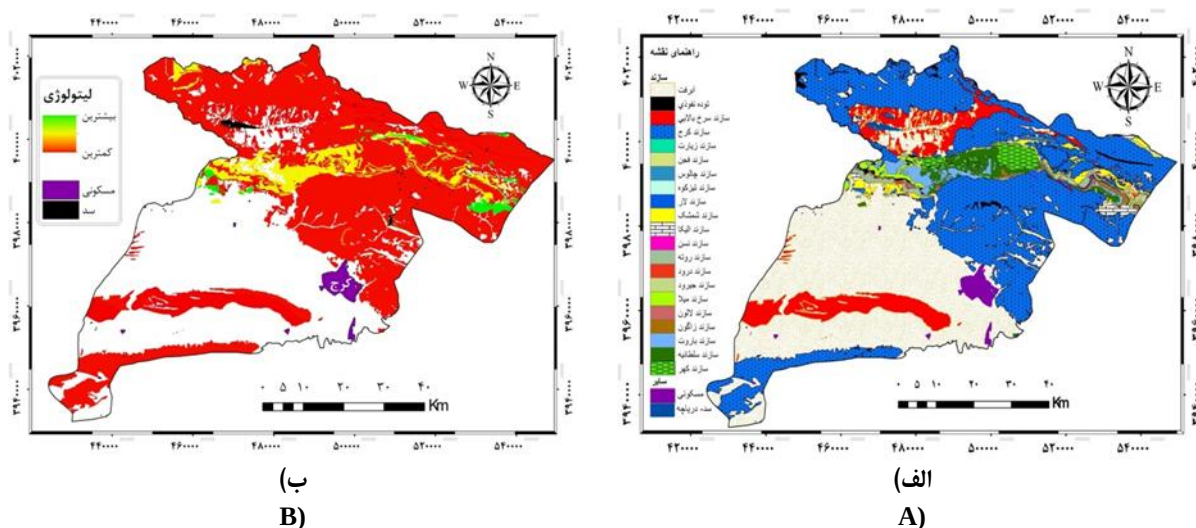
علت این دسته‌بندی تمرکز این تحقیق بر روی مناطق دارای پتانسیل بالا می‌باشد.

لایه لیتولوژی: اعمال تابع بولین در لیتولوژی محدوده مطالعاتی بدین شکل است که به بخش‌های مربوط به سازندهای سخت مقدار ۱ و به بخش‌های آبرفتی مقدار ۰ اختصاص داده شد. از طرفی، سازندها به پنج گروه زیر دسته‌بندی شدند که نتایج آن به شرح زیر است.

واحدهای سنگی کربناته با پتانسیل آبی خوب: سازندهای آهکی مبارک، لار (بخش بالایی)، آبناک، تیزکوه و واحد Kub به سن کرتاسه بالایی جزء این گروه می‌باشند. واحدهای سنگی کربناته با پتانسیل آبی نسبتاً خوب: سازندهای میلا (ممبر دوم و سوم)، الیکا (ممبر بالایی) و واحدهای Kua و Kuc جزء این گروه می‌باشند.

واحدهای سنگی کربناته با پتانسیل آبی متوسط: سازندهای بایندر (بخش کربناته)، سلطانیه (بخش بالایی)، باروت (بخش پایینی)، میلا (بخش پایینی)، جیرود (بخش‌های Cjd, Cjc و Cjb)، روته، الیکا (ممبر میانی)، لار (بخش پایینی) و واحد Ev جزء این گروه می‌باشند.

واحدهای سنگی غیرکربناته با پتانسیل آبی کم: از سازندهای این گروه می‌توان به کهر، بایندر، سلطانیه (بخش شیل چپقلو)، باروت، زاگون، لالون، کوارتزیت

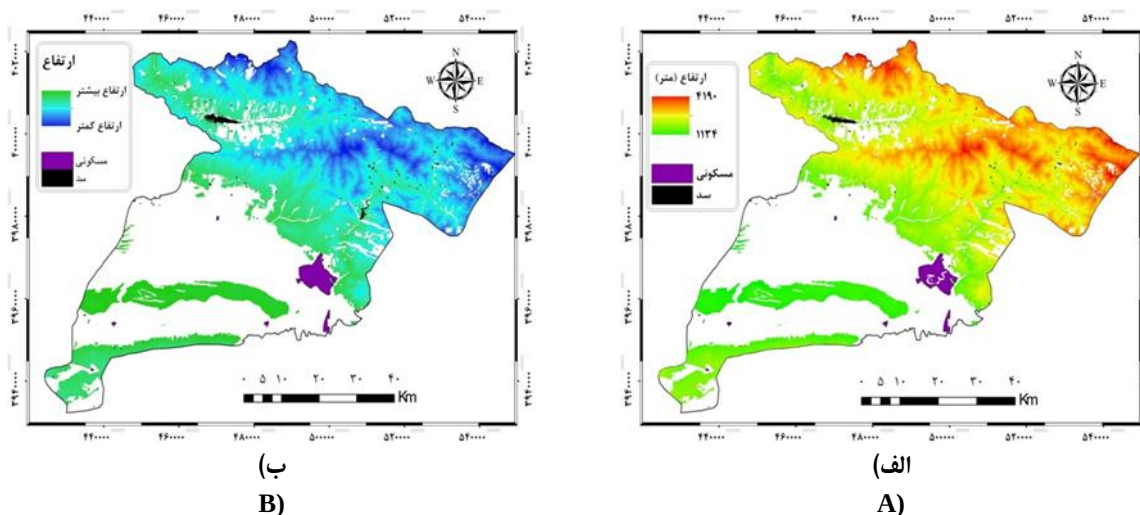


شکل ۳. الف) نقشه لیتولوژی و ب) نقشه فازی شده لیتولوژی منطقه مورد مطالعه.

Fig. 3. A) Lithological Map and B) Fuzzification Map of Lithology of The Study Area.

ارتفاع: اگرچه ارتفاع به عنوان یک عامل مستقل در پتانسیل آب عمل می کند اما از آنجایی که راه های دسترسی به ارتفاعات منطقه، صعب العبور بوده، لذا حتی اگر دارای پتانسیل بالای آب زیرزمینی باشد، استخراج آن مقرون به صرفه نخواهد بود. نقشه DEM منطقه در شکل ۴ نشان داده شده است. محدوده تغییرات ارتفاع بین ۱۱۳۲۴ تا ۴۱۹۰ متر می باشد که با استفاده از تابع خطی کاهشی، استانداردسازی گردید.

با توجه به لیتولوژی، عوارض تکتونیکی (نظیر درز و شکاف، شکستگی و گسل خوردگی)، عوارض کارستی، ضخامت، مساحت و شیب لایه ها، سازندهای زمین شناسی محدوده از نظر پتانسیل آبی مورد بررسی و به شرح شکل ۳ پهنه بندی گردیده اند. در آخر با استفاده از توابع تبدیل بردار به رستر و با عملگر فازی از توابع پردازشی GIS، نقشه لیتولوژی تبدیل به یک لایه رستری فازی شد که در آن ارزش هر پیکسل نشان دهنده پتانسیل آن پیکسل در وجود آب زیرزمینی است (شکل ۳).



شکل ۳. الف) نقشه تراز ارتفاعی و ب) نقشه فازی شده منطقه مورد مطالعه.

Fig. 3. A) Elevation Map and B) Fuzzification Map of Elevation for The Study Area.

آمار ایستگاه های باران سنج منطقه به صورت خطی بوده و رابطه ریاضی به صورت $Y = 0.38X - 0.223$ به دست آمده

بارش: همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، رابطه برازش داده شده به نمودار ارتفاع و بارش با توجه به

نقشه تراکم آبراهه و نقشه استاندارد شده تراکم آبراهه منطقه، تهیه شده توسط تابع خطی افزایشی به دست آمده است (شکل ۶).

شیب: بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته، محدوده تغییرات شیب موردنظر بین ۰ تا ۵۷ درجه می‌باشد که با استفاده از تابع خطی افزایشی، استانداردسازی گردید. نقشه شیب منطقه و نقشه فازی شده شیب در شکل ۷ آورده شده است.

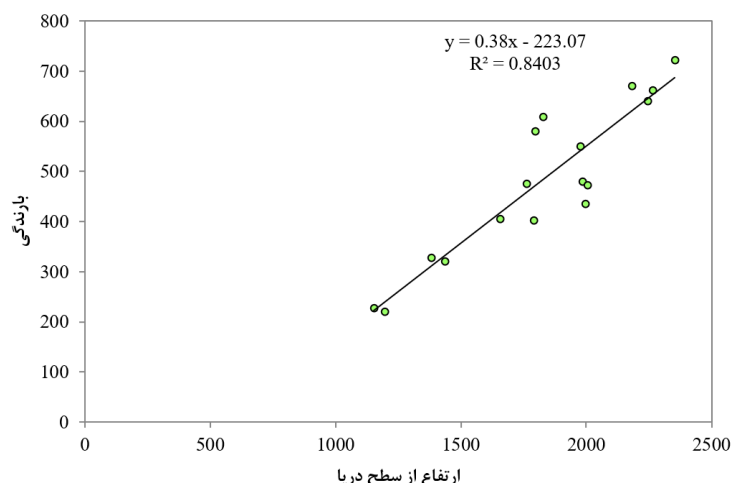
تراکم آبراهه:

تراکم آبراهه منطقه تهیه شده توسط تابع خطی افزایشی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تابع تراکم گسل‌ها همانند تراکم آبراهه‌ها تهیه شده است.

است. بر این اساس، نقشه استاندارد شده بارش منطقه تهیه شده توسط تابع خطی افزایشی به دست آمده است (شکل ۶).

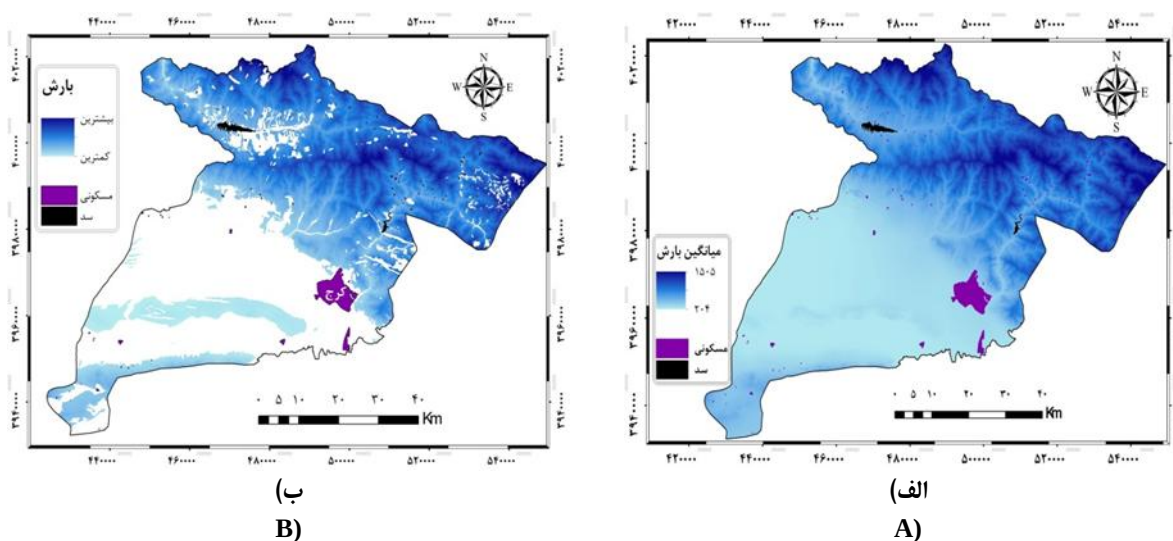
شیب: بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته، محدوده تغییرات شیب موردنظر بین ۰ تا ۵۷ درجه می‌باشد که با استفاده از تابع خطی افزایشی، استانداردسازی گردید. نقشه شیب منطقه و نقشه فازی شده شیب در شکل ۷ آورده شده است.

تراکم آبراهه:



شکل ۵. رابطه میانگین بارش سالانه و ارتفاع ایستگاه باران‌سنج

Fig. 5. The Relationship Between The Average Annual Precipitation and The Elevation of The Meteorological Station.

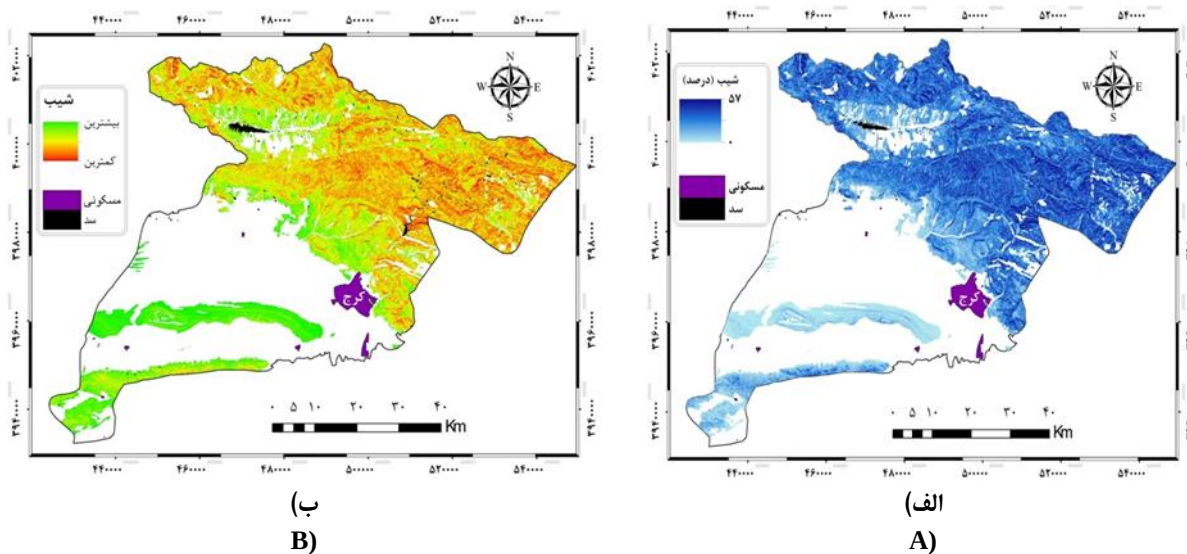


(ب)
B)

(الف)
A)

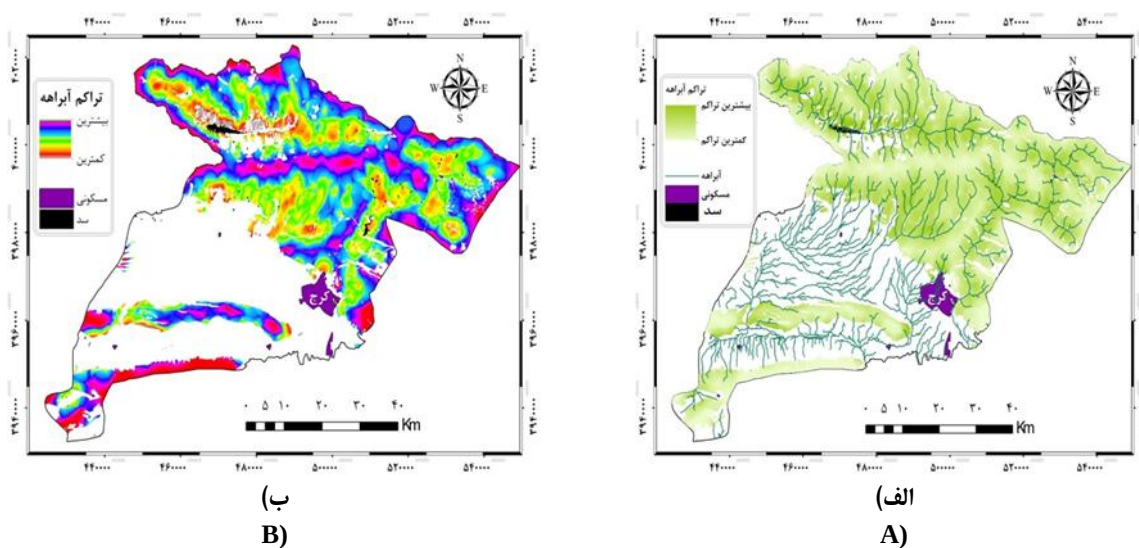
شکل ۶. الف) نقشه پراکندگی مکانی بارش و ب) نقشه فازی شده استان البرز.

Fig. 6. A) Spatial Distribution Map of Average Annual Precipitation in Alborz Province and B) Fuzzification of It.



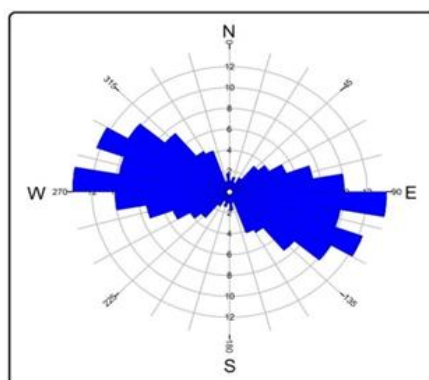
شکل ۷. الف) نقشه شیب منطقه مورد مطالعه و ب) نقشه فازی شده آن.

Fig. 7. A) Slope Map of The Studied Area And B) Fuzzification Slope Map.



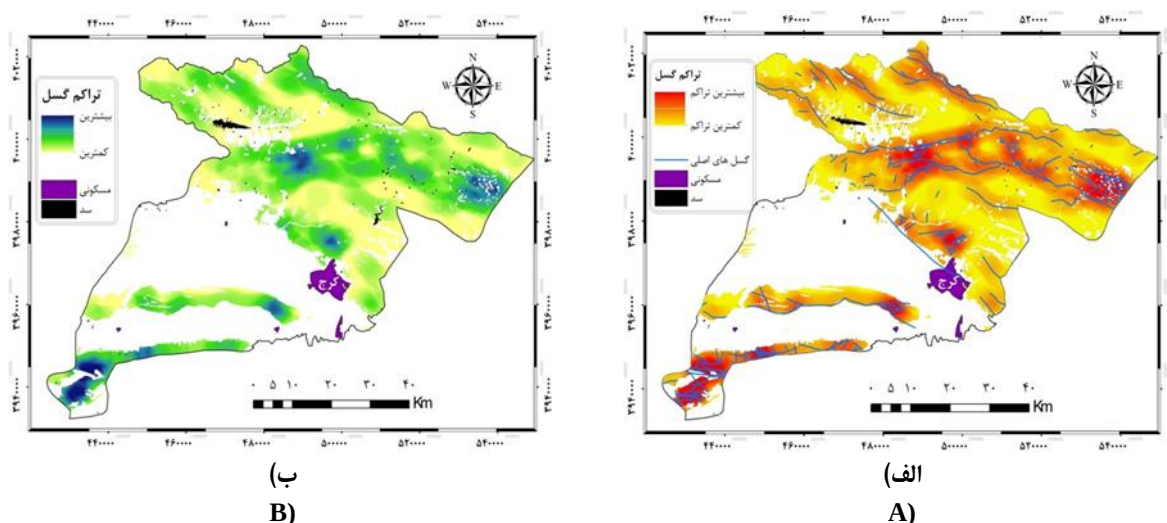
شکل ۸. الف) نقشه تراکم آبراهه و ب) فازی شده آن در منطقه مورد مطالعه

Fig. 8. A) Stream Density Map and B) Fuzzification Stream Density Map (Right) in The Study Area.



شکل ۹. رز دیاگرام گسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه

Fig. 9. Rose Diagram of Faults in The Studied Are



شکل ۱۰. الف) نقشه تراکم گسل منطقه مورد مطالعه و ب) نقشه فازی شده تراکم گسل.

Fig. 10. A) Fault Density Map and B) Fuzzification Fault Density Map in The Study Area.

پتانسیل آب زیرزمینی سازند سخت (HR-GPI) ارائه می‌شود. در این روش با توجه به تنوع لیتولوژیکی سازندهای منطقه که دربرگیرنده سنگ‌های نفوذی، دگرگونی و رسوبی می‌باشد، می‌توان از بارش به‌عنوان عامل جایگزین نفوذ I (که در تعریف مدل اصلی تابعی از کارست شدگی می‌باشد) استفاده نمود. همچنین با توجه به این‌که این تحقیق در سازند سخت انجام می‌گیرد و منطقه به لحاظ پوشش گیاهی و خاک لخت بوده لذا فاکتور S یا نوع خاک حذف شده و متقابلاً نقشه‌های تراکم گسل (F) و تراکم آبراهه (W) به مدل اضافه شده است. بنابراین، معادله زیر در تعیین پتانسیل آبی سازندهای سخت ارائه می‌شود:

$$APLRFW = (aA + bP + cL + dR + eF + fW) * L_b \quad (9)$$

که در آن APLRFW نمایانگر معیارهای ارتفاع (A)، شیب (P)، لیتولوژی (L)، بارش (R)، تراکم گسل (F) و تراکم آبراهه (W) هستند. ضریب L_b نیز نقشه بولین لیتولوژی برای وزن‌دهی صفر به بخش آبرفتی و تکیه بر پتانسیل سازندهای سخت در محدوده مطالعاتی می‌باشد. بر اساس تجربیات به‌دست‌آمده در مباحث پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی، ضرایب هر کدام از این معیارها با توجه به شرایط اقلیمی، هیدروژئولوژیکی، هیدرولوژیکی و زیرسطحی متغیر خواهند بود (ضرایب a تا f) و قضاوت کارشناسانه در تعیین آن‌ها مؤثر خواهد بود. در این

وزن دهی نقشه‌های معیار

از مدل‌های متعددی نظیر APLIS (Motamedi et al., 2018)، DEFLOGIC (Mohammadi et al., 2007) و غیره) برای ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در کشور استفاده شده است. برای مثال، در روش APLIS با بیان ریاضی (Andreo et al, 2008)، برای برآورد متوسط تغذیه سالانه به داخل آبخوان به‌عنوان درصدی از بارش، استفاده می‌شود. با ترکیب برخی از متغیرهای ذاتی هر آبخوان، یعنی ارتفاع از سطح دریا (A)، شیب (P)، لیتولوژی (L)، نفوذپذیری زمین (I) و نوع خاک (S) می‌توان نرخ تغذیه را محاسبه نمود. پس از آن، مارین (Marín, 2009) با معرفی عامل جدیدی به نام فاکتور تصحیح (F_h) و همچنین بسط دامنه عامل "لندفرم‌های مؤثر در تغذیه، این روش را اصلاح نمود و با عنوان Modified – APLIS معرفی کرد.

$$APLIS = R = (A + P + 3L + 2I + S) / 0.9 \quad (7)$$

$$M - APLIS = R = [(A + P + 3L + 2I + S) / 0.9] F_h \quad (8)$$

با این حال و از آنجایی که مدل‌های هیدروژئولوژیکی (APLIS و M-APLIS) برای مناطق خاص تعریف می‌شوند و مبنای تجربی دارند، لذا لازم است در استفاده از آن‌ها در مناطق دیگر که شرایط اقلیمی، هیدروژئولوژیکی، هیدرولوژیکی و زیرسطحی متفاوتی دارند جانب احتیاط را رعایت نمود. در اینجا روشی جهت

شده (جدول ۳) و پس از ایجاد ماتریس مناسب با ضریب سازگاری استاندارد، وزن‌دهی نهایی ارائه گردیده است (شکل ۱۱). جهت تصمیم‌سازی قضاوت کارشناسانه از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده است و پس از آن، با استفاده از توابع فازی مدل رده‌بندی شده است.

تحقیق، وزن‌دهی به نمایه‌های تأثیرگذار به روش رده‌بندی و با استفاده از ترکیبی از دانش کارشناسی، تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی (FUZZY-AHP) و تجزیه و تحلیل اطلاعات موجود در نرم‌افزار Expert Choice انجام شده است. ابتدا پارامترهای مؤثر به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه و ماتریس مقایسه تحلیل سلسله‌مراتبی تشکیل

جدول ۳. ماتریس مقایسه پارامترهای مؤثر در مدل

Table 3. Pairwise Comparison Matrix of The Effective Parameters in The Model.

	A	P	L	R	F	W
A	1	1	0.33	0.5	0.5	3
P	-	1	0.5	0.5	1	3
L	-	-	1	1	2	3
R	-	-	-	1	1	3
F	-	-	-	-	1	3
W	-	-	-	-	-	1

Maximum Eigen Value =6.3; C.I.=0.06



شکل ۱۱. وزن‌های اختصاص یافته به عوامل مؤثر در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی

Fig. 11. Weights Assigned to The Effective Factors For Assessing of Groundwater Potential

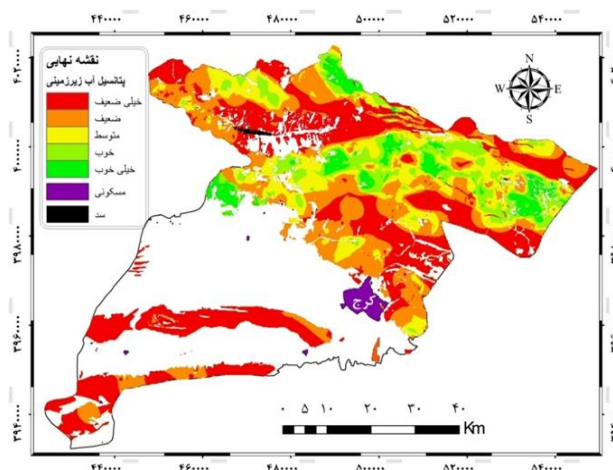
تشکیل می‌دهند. قسمت‌های جنوبی سازندهای سخت هرچند دارای آبدهی مناسب باشند اما به علت حضور سازند سرخ بالایی که مخرب کیفیت است، جهت بهره‌برداری توصیه نمی‌گردد. به‌طورکلی، مناطق با پتانسیل خیلی خوب و خوب در استان البرز، با تراکم گسل بالا، تراکم زهکشی کم و مناطق با شیب ملایم و همچنین با لیتولوژی از نوع آهک پیوند دارند. مناطق با پتانسیل خیلی ضعیف و ضعیف نیز با مناطق مرتفع‌تر همراه با شیب‌های تند موافق هستند. با توجه به طبقه‌بندی صورت گرفته در نقشه نهایی آب زیرزمینی، تنها ۲۱ درصد منطقه دارای پتانسیل خوب و خیلی خوب برای استخراج آب زیرزمینی هستند و به ترتیب ۲۹، ۲۰ و ۳۰ درصد از سازندهای سخت دارای پتانسیل خیلی ضعیف، ضعیف و متوسط از نظر آب زیرزمینی هستند. در جدول ۴، نتایج طبقه‌بندی پتانسیل آب

تلفیق نقشه‌های معیار

همان‌طور که در پیش گفته شد، عملگرهای فازی مختلفی در GIS وجود دارد، که در این تحقیق از عملگر عطفی فازی (AND) استفاده شده است. در این مرحله روی هم‌گذاری زیرمعیارهای هر معیار با دستور Fuzzy overlay که یکی از توابع Spatial analyst در محیط ArcGIS10 است، صورت گرفت. شکل ۱۲ نقشه اولیه مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و GIS و از طریق تلفیق لایه‌های ذکر شده را نشان می‌دهد. آنالیز این نقشه نشان می‌دهد که مناطق با پتانسیل بالا در درجه اول در منطقه میانی یعنی نواحی شمالی قسمت تهران- کرج، محل مرز مشترک محدوده طالقان - الموت با هشتگرد و قسمت شمالی محدوده قزوین متمرکز شده‌اند که ۶۳۲/۴۱ کیلومترمربع از کل سازندهای منطقه مورد مطالعه را

زیرزمینی معرفی شده است؛ بنابراین ضرورت دارد که از مطالعات تکمیلی، نظیر حفر گمانه و مطالعات ژئوفیزیکی نیز برای صحت‌سنجی نهایی مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی استفاده گردد.

زیرزمینی در استان البرز برحسب درصد و همچنین مساحت، که در نرم‌افزار GIS و پس از تلفیق لایه‌ها به‌دست‌آمده، ارائه شده است. در مطالعه حاضر، فقط مناطق با پتانسیل بالا و مستعد جهت بهره‌برداری آب



شکل ۱۲. نقشه نهایی مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی در سازندهای سخت استان البرز

Fig. 12. Final Map of High Potential Zones of Groundwater in Hard Rock of Alborz Province.

جدول ۴. طبقه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی و مساحت آن‌ها (برحسب درصد و کیلومترمربع) پس از تلفیق لایه‌ها

Table 4. Classification of groundwater potential zones and coverage areas (in terms of percent and km²) after layer overlay

مساحت (کیلومترمربع) Area (Square Kilometer)	منطقه تحت پوشش (%) Cover Area (%)	محدوده رده Class Range	رده Class
۸۷۳/۳۳	۲۹	۰	مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی خیلی ضعیف
۶۰۲/۳	۲۰	۰-۲۵	مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی ضعیف
۹۰۳/۴۵	۳۰	۲۵-۵۰	مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی متوسط
۳۶۱/۳۸	۱۲	۵۰-۷۵	مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی خوب
۲۷۱/۰۳	۹	۷۵-۱۰۰	مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی خیلی خوب

زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که دو معیار لیتولوژی و بارش به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۲۶ و ۰/۲۰ نسبت به سایر معیارها از اولویت بالاتری در شبیه‌سازی پتانسیل آب زیرزمینی در این منطقه برخوردار هستند. از سوی دیگر، دو عامل تراکم آبراهه و ارتفاع نیز به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۱۰ و ۰/۱۳ از اهمیت کمتری در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی برخوردار بودند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این وزن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده در مطالعات خداکرمی و همکاران (Khodakarami et al., 2022) هم‌خوانی مناسبی دارند.

از طرفی، روش‌های مستقیم صحت‌سنجی مدل نیز می‌تواند به کارشناسان کمک کند. ازاین‌رو، برای

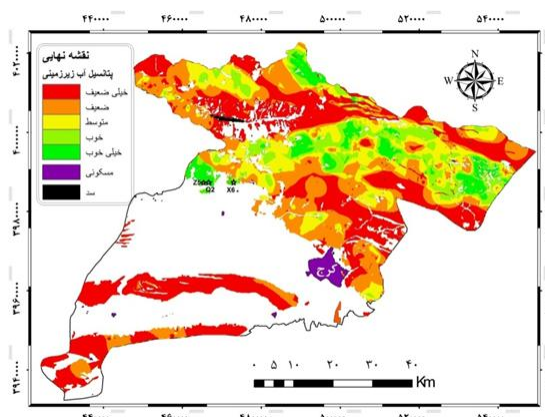
صحت‌سنجی مدل با استفاده از آبدهی چشمه‌ها و مطالعات ژئوفیزیک

میزان دقت هر مدل بستگی به صحت پارامترهای مؤثر در همپوشانی نهایی دارد و قابل ارزیابی است. در روش‌های تصمیم‌سازی به‌ویژه تحلیل سلسله‌مراتبی، مهارت متخصصین در اولویت‌دهی به درجات اهمیت پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. بنابراین، در صورت وجود مطالعات مشابه در زمینه علمی یا در محدوده مطالعاتی، مقایسه ورودی‌ها می‌تواند به‌طور چشمگیری در دستیابی به نتایج دقیق‌تر و معتبرتر کمک کند. در مطالعه حاضر، ارزیابی معیارها به‌منظور تعیین مناطق مستعد آب

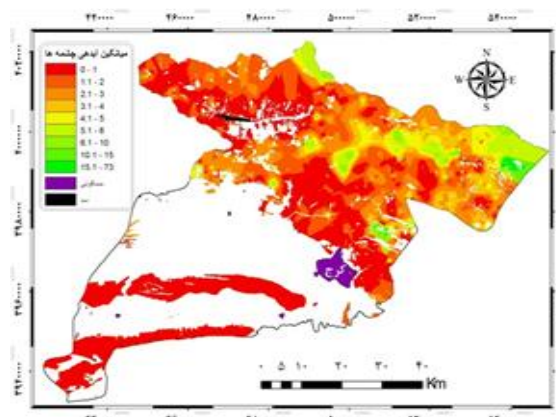
است. برداشت‌های میدانی این مطالعات از پاییز سال ۹۰ توسط سه گروه صحرایی شروع شد. در این مطالعات، جمعاً ۲۴۲ سونداژ اصلی در امتداد ۲۸ پروفیل و با فاصله ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر از یکدیگر و ۱۳۰ سونداژ تکمیلی در امتداد ۲۸ پروفیل با فاصله ۲۰ تا ۲۵ متر انجام شد. در این تحقیق پس از تعبیر و تفسیر پروفیل‌های برداشت‌شده و انجام پیمایش‌های زمینی، تعداد ۶ نقطه به جهت حفاری اکتشافی پیشنهاد داده شد که سه نقطه از نقاط مذکور در سازندهای سخت استان البرز واقع شده است (شکل ۱۳). همان‌طور که مشاهده می‌شود این سه نقطه در قسمت‌های با پتانسیل بالای آب زیرزمینی همخوانی دارند و در ادامه نوار مرکزی معرفی شده دارای پتانسیل بالای آب زیرزمینی می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل نهایی از لایه رستری چشمه استفاده شده است. برای انجام این کار داده‌های نقطه‌ای چشمه‌ها در GIS فراخوانی شده و با استفاده از روش‌های درون‌یابی و بر اساس فیلد میانگین دبی تمامی چشمه‌های موجود در استان البرز سطح مورد نظر (نقشه دبی چشمه‌ها) برازش داده شد (شکل ۱۳). همان‌طور که مشاهده می‌شود در اکثر مناطق هر دو نقشه با هم تطابق دارند و مؤید نقشه نهایی تولید شده توسط مدل می‌باشد.

علاوه بر این، در سال ۱۳۹۰، شرکت مهندسين مشاور زمین آب پی مطالعات ژئوفیزیک، با استفاده از روش ژئو الکتریک، را در گستره مطالعاتی سازندهای سخت شمال استان تهران انجام داد. مطالعات ژئوفیزیک پیشین عموماً موردی و در قالب طرح‌های کوچک تأمین آب انجام شده



(ب)
B)



(الف)
A)

شکل ۱۳. الف) نقشه مناطق با پتانسیل بالای آبدهی چشمه‌ها و ب) موقعیت سه نقطه معرفی شده شرکت مهندسين مشاور زمین آب پی به‌عنوان نقاط با پتانسیل بالای آب زیرزمینی، جهت حفاری اکتشافی.

Fig. 13. A) The Map of High Potential Zones of Spring Yields and B) The Location of Three Points Introduced By Zemin-Ab-Pey Consulting Engineers Company as High Groundwater Potential Points for Exploratory Drilling.

پیش‌بینی‌های صورت گرفته در مورد افزایش جمعیت این استان در افق ۱۴۲۵، نتایج این تحقیق به‌عنوان دید اولیه و همچنین دستورالعملی برای برنامه‌ریزی و مکان‌یابی مناطق بالقوه آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق تحت تنش آبی، برای مدیران محترم شرکت آب منطقه‌ای این استان عمل خواهد کرد. عوامل کنترلی مانند زمین‌شناسی، شیب، تراکم گسل، تراکم آبراهه، بارش و ارتفاع برای این مطالعه در نظر گرفته شده است. فازی-AHP به‌دلیل مزیت آن در تعیین اهمیت معیارها با اعداد فازی استفاده شده است. این مطالعه و نقشه نهایی حاصل از آن توصیه

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از تلفیق مطالعات سنجش‌ازدور و GIS و همچنین روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و فازی برای مدل‌سازی مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی در سازندهای سخت استان البرز، به‌عنوان یکی از استان‌های مهاجرخیز کشور استفاده شد. تلفیق روش‌های مذکور به نظر می‌رسد که به‌اندازه کافی برای این منظور موفق بوده و از کارایی لازم برای ارائه پیشنهادی در مورد مناطق بالقوه منطقه آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه برخوردار بوده است. با توجه به سند چشم‌انداز منطقه و

southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16(5), 911-925.

Azareh, A. (2023). Evaluating Groundwater Resources Potential in Herat-Marvast Plain Using a Combined Method of Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Logic. *Irrigation and Water Engineering*, 13(3), 234-250. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.168322> [In Persian]

Combettes, P.L. (1993). The foundations of set-theoretic estimation. *Proceedings of the IEEE*, 81(2), 182-208.

Das, B., and Pal, S.C. (2019). Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of West Bengal, India. *Hydroresearch*, 2, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.10.001>

Dashti Barmaki, M., Rezaei, M. & Madadi, S. (2020). Use of fractal dimensions analysis in geographic information systems and remote-sensing techniques to identify groundwater prospective zones in the Anar-Dashtegol anticline, Iran. *Carbonates Evaporites* 35, 4.

<https://doi.org/10.1007/s13146-019-00535-x>.

Dashti Barmaki, M., Rezaei, M., & Ashjari, J. (2015). Karst groundwater potential in Davan and Shapour Mountains based on Multiple Criteria Decision Making. *Iranian Water Researches Journal*, 9(1), 89-100. [In Persian]

Dubois, D. and Prade, H. (1985). A review of Fuzzy Set Aggregation Connectives. *Information Sciences*, 36: 85-121.

Ehsanifar, M., Hamta, N., & Saghari, M. (2021). Optimal Hospital Location Using Combined Approach of GIS and ANP under Fuzzy Environment (Case Study in Arak City). *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(6), 301-324.

<https://doi.org/10.22065/jsce.2020.183168.1844>.

[In Persian]

El-Naqa, A., Hammouri, N., Ibrahim, K., and El-Taj, M. (2009). Integrated Approach for Groundwater Exploration in Wadi Araba Using Remote Sensing and GIS. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 3(3), 229-243.

Hammouri, N., El-Naqa, A., and Barakat, M. (2012). An Integrated Approach to Groundwater Exploration Using Remote Sensing and Geographic Information System. *Journal of Water Resource and Protection*, 4 (9), 717-724.

Hsin-Fu, Y., Cheng-Haw, L., Kuo-Chin, H., and Po-Hsun, Chang. (2008). GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environ Geology Journal*, 10(1), 1504-1509.

Khedri, A., Rezaei, M., & Ashjari, J. (2014). Assessing Karst Development Potential in Pion Poyon Anticline using GIS, RS, and Analytical Hierarchy Process (AHP). *Iran-Water Resources Research*, 9(3), 37-46. [In Persian]

می‌کند که مطالعات بیشتر در این منطقه باید بر مناطق مرکزی محدوده یعنی نواحی شمالی قسمت تهران- کرج، محل مرز مشترک محدوده طالقان - الموت با هشتگرد و قسمت شمالی محدوده قزوین که در این مطالعه حدود ۲۱ درصد و معادل ۶۳۲/۴۱ کیلومترمربع از کل سازندهای سخت استان است، متمرکز شود. این مناطق از پتانسیل بالایی در وجود مخازن آب زیرزمینی برخوردارند. از ویژگی مناطق مستعد آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه، شیب ملایم، ارتفاع کم، و تراکم بالای گسل است. مناطق مذکور عمدتاً دارای لیتولوژی آهک بوده و از بارش مناسبی برخوردارند. این نتایج با مطالعات Dashti et al. (2020) و آذره (2023) همسویی قابل قبولی دارد.

محققین در این پژوهش با محدودیت‌های متعددی مواجه بوده‌اند. نخست، داده‌های هیدروژئولوژیکی، مانند سری‌های زمانی آبدهی چشمه‌ها، به‌طور کامل در دسترس نبوده و بیشتر داده‌ها از منابع ثانویه استخراج شده‌اند که این امر می‌تواند دقت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر این، در مطالعه حاضر از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ استفاده شده است که ممکن است جزئیات محلی را به‌دقت نشان ندهند. برای رفع این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود مطالعات دقیق‌تری شامل محاسبات هیدروگراف چشمه‌ها، تحلیل‌های شیمیایی آب و بررسی دینامیک آبخوان‌ها انجام شود تا نتایج تحقیق به‌طور مؤثرتری تأیید گردد. همچنین بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی منطقه ضروری به نظر می‌رسد، زیرا این عامل می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت نقش کلیدی ایفا کند.

منابع

- Aghanabati, S.A. (2004). *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran. 606 p. [In Persian]
- Ally A.M., Yan, J., Bennett, G., Lyimo, N.N., Mayunga, S.D. (2024). Assessment of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based fuzzy analytical hierarchy process (F-AHP) in Mpwapwa District, Dodoma, Tanzania. *Geosystems and Geoenvironment*, 3 (1):100232.
- Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Jiménez, P., López-Geta, J. A., & Carrasco, F. (2008). Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in

- Khuzestan). *Water Resources Engineering*, 13(45), 99-112. [In Persian]
- Prasad, R. K., Mondal, N.C., Pallavi, B., and Nandakumar, M.V. (2007). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environ Geology Journal*, 55(3), 467-475.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Sener, A., Davraz, A., and Ozcelik, M. (2005). An Integration of GIS and Remote Sensing in Groundwater Investigations: A Case Study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 13(6), 826-834.
- Shao, Z., Huq, M. E., Cai, B., Altan, O., & Li, Y. (2020). Integrated Remote Sensing and GIS Approach using Fuzzy-AHP to Delineate and Identify Groundwater Potential Zones in Semi-Arid Shanxi Province, China. *Environmental Modelling & Software*, 134:104868.
- Shekar, P.R., Mathew, A., (2023). Assessing groundwater potential zones and artificial recharge sites in the monsoon-fed Murredu river basin, India: An integrated approach using GIS, AHP, and Fuzzy-AHP. *Groundwater for Sustainable Development*, 23: 100994.
- Soori, S., Baharvand, S., Amiri, V. (2017). Delineation of groundwater potential using AHPFuzzy (A Case Study: Romeshgan plain) Subject Areas. *Journal of Environmental Geology*, 11(40), 11-26. [In Persian]
- Subba Rao, N., Chakradhar, G., Srinivas, V. (2001). Identification of groundwater potential zones using remote sensing techniques in and around Guntur Town. *Andhra Pradesh, India*, 29(2), 69-78.
- Trillas, E., Alsina, C., and Valverde, L. (1983). On some logical connectives for fuzzy set theory. *Journal of Mathematical Analysis and its Applications*, 93, 15-26.
- Yager, R.R. (1991). Connectives and quantifiers in fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 40, 39-75.
- Yager, R.R., and Kelman, A. (1996). Fusion of fuzzy information with considerations for compatibility, partial aggregation, and reinforcement. *International Journal of Approximate Reasoning*, 15(2), 93-122.
- Khedri, A., Rezaei, M., Ashjari, J. (2011). Potential of Karstic Water Resources in Poyon Anticline Using RS and GIS, 4th Iran Water Resources Management Conference, AmirKabir University & Iranian Association of Water Resources (IR-W.R), Tehran, Iran. [In Persian]
- Khodakarami, A., Hooshyar, M., Javid, A., & Hosseini, S. A. (2022). Finding the Potential of Underground Water Resources of Saghez City using Fuzzy Hierarchical Analysis Process (FAHP) in GIS. *Journal of Geography and Regional Development*, 20(4), 173-133. <https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.77871.1180> [In Persian]
- Magesh, N.S., Chandrasekar, N., Soundranayagam, J.P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS, and MIF techniques. *GEOSCIENCE FRONTIERS*, 3(2), 189-196.
- Mahdavi, A., & Akhavan, S. (2018). Site Selection and Prioritizing the Suitable Sites for Groundwater Artificial Recharge Using Fuzzy Logic, Boolean Logic, and Overlay Method. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(5), 1253-1265. [In Persian]
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis: Evaluation Criteria and Criterion Weighting*. John Wiley & Sons, Inc. 392 pp.
- Marín, A.I. (2009). Los sistemas de información geográfica aplicados a la evaluación de recursos hídricos y a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos carbonatados. Caso de la Alta Cadena (Provincia de Málaga). Bachelor Thesis, University of Malaga.
- Mohammadi, Z., Rangzan, K., Alijani, F. (2007). Introducing the new DEFLOGIC model for assessing the potential of karst groundwater in GIS. 25th Symposium of Geosciences, Geological Survey & Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran. [In Persian]
- Motamedi rad, M., goli mokhtari, L., bahrami, S., & zanganeh asadi, M. (2018). Assessment of Infiltration Potential Using the AHP, APLIS, and Modified APLIS Models (Case Study: Roein Esfarayen Basin). *Quantitative Geomorphological Research*, 7(2), 117-139. [In Persian]
- Nikzad, V., Amiri, M. J., Moarab, Y., & Foroughi, N. (2017). Using Fuzzy Logic Analysis and Fuzzy ANP (FANP) Method in GIS for Landfill Site Selection (Case Study: Aliabad City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(1), 67-87. <https://doi.org/10.22067/geo.v6i1.47944>. [In Persian]
- Pourakbari, S., Kalantari, N., Aghdaki, Y., & Moslih, A. (2020). Potential of Karstic Water Resources Using RS, GIS, and AHP (Case Study: Lilly and Kenno Anticlines in the North East of

