



Evaluating The Potential For Karst Development in The Anticlines of The Northwest of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province Using GIS and A Fuzzy Method to Determine Areas Susceptible to Groundwater Exploitation

Sajjad Pourakbari¹, | Nasrollah Kalantari² | Abbas Charchi³ | Seyyed Sajedin Mousavi³

1. Corresponding author, PhD student in Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

✉ Corresponding Author: sajadakbari66@gmail.com

Submit Date
26 April 2025

Revise Date
16 September 2025

Accept Date
16 September 2025

Keywords:

*Karstification potential,
GIS,
Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad
province,
FAHP.*

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 have exacerbated challenges related to the drinking water supply. Given the extensive exploitation of surface and alluvial water sources, identifying new resources in karst 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 (Pourakbar et al., 2020; Saberinasr et al., 2025; Sarmah and Sarma, 2025). Both global and local studies have demonstrated that these methods 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: Pourakbari, S., Kalantari, N., Charchi, A., & Mousavi, S.S. (2025). Evaluating the potential for karst development in the anticlines of the northwest of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province using Gis and a fuzzy method to determine areas susceptible to groundwater exploitation. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (2), 1-24. DOI: <http://10.22077/jaaq.2025.9291.1110>.



Copyright: © 2025 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 presents the karstification potential of a large area of the northwestern Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad provinces with the help of remote sensing and geographic information systems, and using hydrogeological and geomorphological data, the validity of the karst potential map is controlled. The results of this study facilitate the sustainable management and planning of groundwater resources and can ensure their availability and sustainability for future generations.

Materials and Methods

The study area is located in the northwest of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad provinces. In terms of climate, this area is often influenced by Mediterranean currents and the subtropical high-pressure center. Based on the Dumartin climatology, the study area is a semi-humid to humid region, and the average rainfall of the karst basins of the study area, including the Siah, Lar, and Nil karst basins, is estimated to be 836, 1086, and 2025 mm, respectively. Geologically, the Siah, Lar, and Nil anticlines are located in the Zagros fold-thrust belt and south of the Izeh structural zone. The formations in this area include a variety of structures from the Lower Jurassic to the Early Miocene.

In this study, geological and topographic maps, precipitation data, synoptic station records, and Landsat ETM+ satellite images (year 2000) were used to analyze the groundwater resources karst of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province. Data processing was performed using ERDAS 9.1, ArcGIS 10.2, 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, lineament density, elevation, slope, rainfall, temperature, drainage density, and vegetation cover, 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.
- Temperature was based on the temperature-elevation relationship.
- Slope was calculated from the DEM through spatial analysis.
- Drainage density was obtained through Watercourse density analysis.
- Fault density was derived from geological maps and satellite images.
- Vegetation cover from land use Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province maps.

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 karst water resource potential model was introduced and validated with well data, spring, and sinkhole information from the region.

Results and Discussion

This study, aimed at evaluating Karst groundwater potential in the hard formations of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad provinces, collected a range of environmental data and processed them within a GIS environment. Key factors, including lithology, lineament density, elevation, slope, rainfall, temperature, drainage density, vegetation cover, 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 Karst groundwater potential. Carbonate units, such as the Asmari and Sarvak 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. The Elevation, Precipitation and Elevation, and Temperature maps were standardized using linear functions, which indicate a direct relationship between the two factors, elevation, precipitation, and an inverse relationship between elevation, temperature. The slope in the region varies from 0 to 65 degrees and was standardized using decreasing linear functions. Fault and

drainage density analyses indicated that major faults have a northwest-southeast trend, which is consistent with the overall structure of the Zagros Mountain Range. The higher the density of vegetation, the more runoff from heavy rainfall is prevented, the more time is provided for atmospheric precipitation to penetrate, and the more karst groundwater resources are developed.. Finally, vector-to-raster conversion and fuzzy GIS functions were used to create the final maps. The final Karst groundwater potential map revealed that only 27.5% of the area has good or very good potential for groundwater extraction. Additionally, 31.7%, 24.5%, and 16.4% 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 karst groundwater exploitation. Therefore, further studies, such as borehole drilling and geophysical investigations, are necessary to verify the areas with the highest karst groundwater potential. The results provide an effective model for karst groundwater potential mapping in this region, which can be utilized for water resource management and planning in the northwest of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province.

Conclusion

By integrating remote sensing, GIS, and the Fuzzy AHP method, this study identified areas with high Karst groundwater potential in the hard formations of the northwest of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province. The results indicated that lithology (0.39) and precipitation (0.21) are the most influential factors, while drainage density (0.03) and slope (0.02) are of lesser importance. According to this research, the highest potential of karst water resources is related to the central parts of the Nile and the Siah anticlines and the places where springs appear. Also, the lower potential is mostly related to the northwest of the study area, where the Pabdeh and Gurpi formations are exposed.. 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 پتانسیل توسعه کارست در تقادیس‌های شمال غرب استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از GIS و روش فازی برای تعیین مناطق مستعد بهره برداری از آب زیرزمینی

سجاد پوراکبری^۱ ✉ | نصرالله کلانتری^۲ | عباس چرچی^۳ | سید ساجدین موسوی^۳

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

۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

✉ نویسنده مسئول: Sajadakbari66@gmail.com

چکیده

هدف اصلی این مطالعه، تهیه نقشه‌های پتانسیل کارستی شدن در شمال غربی استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) به‌عنوان ابزاری کمکی در تحقیقات هیدروژئولوژیکی است. منطقه مورد مطالعه در شمال غربی استان کهگیلویه و بویراحمد با مساحت ۱۱۴۸ کیلومترمربع واقع شده و دو رودخانه شاه بهرام و تغار از آن عبور می‌کنند. از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش‌ازدور (RS) برای ایجاد نقشه‌ای توسعه کارستی شدن استفاده شد، که شامل پنج کلاس است و از خیلی زیاد تا خیلی کم متغیر می‌باشد. استخراج این نقشه‌ها بر اساس مطالعه داده‌های ورودی مانند: سنگ‌شناسی، تراکم خطواره‌ها، ارتفاع، شیب، بارندگی، دما، تراکم زهکشی و پوشش گیاهی انجام شده است. به همه این عوامل بر اساس ارتباط آن‌ها با پتانسیل کارستی شدن، وزن اختصاص داده شد، درنهایت، نقشه‌ای مبتنی بر سیستم مدل‌سازی مکانی وزن‌دار ایجاد گردید. نتایج نشان می‌دهد که مناطق تغذیه و تخلیه تقادیس‌ها بیشترین پتانسیل کارستی شدن را دارند. چشمه‌ها و دولین‌های موجود در منطقه با پتانسیل کارستی بالا قرار دارند. نتایج، اطلاعات قابل توجهی ارائه می‌دهد و نقشه‌ها می‌توانند توسط مقامات محلی برای بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، حفاظت از کیفیت و مدیریت منابع آب کارستی مورد استفاده قرار گیرند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:

پتانسیل کارستی شدن،

GIS،

استان کهگیلویه و بویراحمد،

FAHP

مقدمه

سازنده‌ای کربناتی کارستی شده از جمله مهم‌ترین منابع آب در مناطق جنوبی و غربی ایران هستند (Karimi et al., 2003; Ashjari and Raeisi, 2006). کارستی شدن معمولاً در سنگ‌های رسوبی بیوژنیک، بیوشیمیایی و شیمیایی رخ می‌دهد؛ عمدتاً در سنگ‌های کربناته مانند سنگ‌آهک و دولومیت (Johnson and Stieglitz, 1990; Groves and Meiman, 2005; De Waele et al., 2009) و همچنین در سنگ‌های سولفاته مانند ژیپس و انیدریت (Black, 1997; Calaforra and Pulido-Bosch, 2003). ویژگی لندفرم‌های کارستی شامل کانال‌های باز شده توسط انحلال (karren) و همچنین فرورفتگی‌های بسته با منشأ، ساختار و ابعاد متفاوت (dolines, poljes) هستند. سویچج (Cvijic, 1893) دولین‌های را به‌عنوان «لندفرم‌های دیاژنتیکی کارستی» توصیف کرد (Ford, 2007). چشم‌اندازهای کارستی با سطوح سنگی شیاردار و حفره‌دار، چاه‌ها، گودال‌ها، نه‌رهای فرورونده، چشمه‌ها، سیستم‌های زهکشی زیرسطحی و غارها مشخص می‌شوند. ویژگی‌های منحصربه‌فرد و ماهیت سه‌بعدی چشم‌اندازهای کارستی نتیجه تعامل پیچیده بین محیط زمین‌شناسی، شرایط آب و هوایی و عوامل بیولوژیکی در مقیاس‌های زمانی طولانی است. چشم‌اندازهای کارستی که در آن‌ها انحلال سنگ‌بستر توسط آب فرآیند ژئومورفیک غالب است، تقریباً ۲۰٪ از قاره‌ها را تشکیل می‌دهند و بیش از یک چهارم جمعیت زمین در مناطق کارستی یا نزدیک آن‌ها زندگی می‌کنند (Ford and Williams, 2007). کارستی شدن پیامدهای عملی بسیاری دارد: گودال‌ها در مناطق کارستی خطرات ژئوتکنیکی برای خانه‌ها، خیابان‌ها و سایر زیرساخت‌ها هستند (Field 2010; Vigna et al., 2010). مخازن و سایر زیرساخت‌های هیدرولیکی در کارست اغلب مشکلات ناشی را نشان می‌دهند (Bonacci and Roje-Bonacci 2008; Bonacci et al., 2009a).

مناطق کارستی تنوع زیستی قابل‌توجهی را در سطح، زیرزمین و در اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهند (Humphreys, 2006; Bonacci et al., 2009b). سفره‌های آب کارستی منابع آب شیرین ارزشمندی هستند، اما در برابر آلودگی بسیار آسیب‌پذیرند، زیرا در نتیجه نیاز به حفاظت ویژه دارند (Ravbar and Goldscheider, 2007). سفره‌های آب کارستی عمیق منابع زمین‌گرمایی ارزشمندی هستند (Goldscheider et al., 2010). سازنده‌ای کارستی کربناته در حدود ۲۳ درصد از منطقه زاگرس رخنمون دارند (Ashjari and Raeisi, 2006). سن این سازنده‌ای کارستی مربوط به دوران سنوزوئیک است. کارست در منطقه زاگرس در مقایسه با چنین سازندهایی در سایر مناطق ایران، به‌دلیل منظم بودن چین‌خوردگی در زاگرس و تشکیل آن از سنگ‌های کربناته و غیر آتشفشانی، تفاوت‌هایی دارد، به‌طوری‌که سنگ‌های کربناته ۹۵ درصد از کوه‌ها را تشکیل می‌دهند (Maleki et al., 2009). سنگ‌های کربناته در زاگرس تحت تأثیر عوامل تکتونیکی و آب‌وهوای سرد با بارندگی‌های طولانی قرار دارند که باعث بلوغ و تکامل کارست شده و غارهای زیادی مانند "علی‌صدر" و "شاپور" را ایجاد کرده است (Moghipi, 2010). شکستگی‌های ایجادشده در سنگ‌های کربناته به‌دلیل عوامل تکتونیکی، یک پدیده متوالی در رشته‌کوه‌های زاگرس است و اساساً اولین مرحله کارستی شدن محسوب می‌شود (Maleki et al., 2009). زمین‌های بیابانی دوسوم از خشکی‌های ایران را در برمی‌گیرد که عاری از جنگل و مراتع سبز است. چنین شرایط سخت محیطی و کمبود آب باعث شده است که مردم ایران بیشتر به منابع آب زیرزمینی نسبت به آب‌های سطحی متکی باشند (Baghvand et al., 2010; Bastani et al., 2012; Nosrati and Eeckhaut, 2012). از سوی دیگر، داشتن دانش در مورد منابع آب کارستی و نقشه‌برداری

نشان داد بیشتر مناطق بالقوه در ناحیه مرکزی قرار دارند (Magnabosco et al., 2020). از تحلیل چندمعیاره و GIS برای شناسایی مناطق بالقوه آب زیرزمینی در حوضه اولتو، ترکیه استفاده شد بر این اساس منطقه با ارزیابی هشت عامل لیتولوژی، چگالی خطواره، عمق خاک، کاربری زمین، بارش، ژئومورفولوژی، شیب و تراکم زهکشی تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل بالای آب زیرزمینی در مناطق نزدیک به بستر رودخانه وجود دارد در حالی که پتانسیل آب زیرزمینی در مناطق شیب‌دار کوهستانی و شیب‌دار کم است (Taşci et al., 2025). شناسایی مناطق بالقوه برای تغذیه آب زیرزمینی در ناحیه هاریدوار هند مبتنی GIS و AHP صورت گرفت (Echogdali et al., 2022). از تحلیل چندمعیاره در محیط GIS برای تهیه نقشه توزیع مناسب بودن مکان برای حفر گمانه‌های تولیدی جدید در استان کورینتیا (یونان) استفاده شده است (Antonakos et al., 2014). از روش مشابهی برای نقشه‌برداری از ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و پتانسیل آب‌های زیرزمینی منطقه هوآی سای (تایلند) با استفاده از تحلیل سطح پتانسیل استفاده شد (Konkul et al., 2014). توسعه کارست در دو تاق‌دیس کینو (رشته‌کوه زاگرس) و شتری (ایران مرکزی) با استفاده از داده‌های ایزوتوپی، هیدرو شیمیایی و ژئومورفولوژیکی مورد مقایسه قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که سفره‌های آب کارستی مناطق خشک در مقایسه با سفره‌های آب کارستی معمولی، ویژگی‌های متفاوتی دارند (Chitsazan et al., 2015). در پژوهشی دیگر تخمین تغذیه آب‌های زیرزمینی را با استفاده از رویکرد GIS ارائه و پنج عامل مؤثر را در نظر گرفته شد: سنگ‌شناسی، پوشش (کاربری) زمین، خطواره‌ها، زهکشی و شیب (Fu Yeh et al., 2016). در ایران، بیش از ۷۰ درصد از جمعیت روستایی و نزدیک به ۵۰ درصد از جمعیت شهری برای تأمین نیازهای

پتانسیل، همیشه نیازمند ابزارها و روش‌های پیچیده و پرهزینه است. برای شناسایی پتانسیل کارست، مشکلات زیادی همچون کمبود اطلاعات در دسترس و هزینه‌ی زیاد جمع‌آوری اطلاعات (تکنیک‌های سطحی و زیر سطحی) وجود دارد. سنجش‌ازدور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌عنوان ابزارهای مفید در نقشه‌برداری پتانسیل کارستی شدن اثبات شده‌اند. داده‌های ماهواره‌ای، اطلاعات پایه‌ای را به‌شکل سریع و مفید در مورد فاکتورهای متعددی همچون ژئومورفولوژی، شیب، کاربری اراضی، الگوی آبراهه‌ها، خطواره و... که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم کنترل‌کننده‌ی پیدایش و جریان آب زیرزمینی هستند، در اختیار ما قرار می‌دهد (J. Ha et al., 2007, 2010). در سال‌های اخیر بسیاری از محققان دریافته‌اند که تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) با اضافه کردن ساختار، قابلیت رسیدگی، شفافیت و دقت به تصمیم‌گیری ابزاری کارآمد برای مدیریت آب فراهم می‌کند (Dunning et al., 2000; Flug et al., 2000; Joubert et al., 2003). فرآیند سلسله‌مراتب تحلیلی (AHP^۱) یکی از روش‌های MCDM است که به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌ی مهندسی منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش اولین بار توسط توماس آل. سااتی در سال ۱۹۸۰ ارائه گردید (Saati, 1980). از آن زمان این روش کاربرد گسترده‌ای در منابع طبیعی و مدیریت زیست‌محیطی و منابع آب پیدا کرده است (Adyat et al., 2012; Chen et al., 2001; Choudhary et al., 2009; Jeh et al., 2010; Kallet et al., 2006; Machival et al., 2010; Mendoza et al., 2006; Pireira et al., 1993; Dermaluvasan, 2003). نقشه پتانسیل آب زیرزمینی کارست در منطقه شهری سیت لاگواس برزیل با استفاده از GIS و بر اساس مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌شناسی، داده‌های آزمایش پمپاژ و سنجش‌ازدور ترسیم گردید و

آشامیدنی و خانگی خود به منابع آب زیرزمینی وابسته هستند (Rahmati, 2013).

متأسفانه، کمبود آب در چندین بخش از ایران رایج است که توسط فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی جهانی تشدید می‌شود (Ghayoumian et al., 2007; Abbaspour et al., 2009; Ayazi et al., 2010; Zarghami et al., 2013; Hosseini et al., 2012; Neshat et al., 2011). در جدیدترین مطالعات از FAHP (تحلیل سلسله‌مراتبی - فازی) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی حوضه کاروانور (Karuvannur) هند پرداخته شد. در این مطالعه از معیارهایی نظیر زمین‌ریخت‌شناسی، شیب، زمین‌شناسی، تراکم آبراهه، تراکم خطواره و کاربری زمین استفاده شد. نقشه نهایی 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 (Bhadran, et al., 2022).

از تلفیق روش‌های مبتنی بر GIS، RS و MCDM پتانسیل آب زیرزمینی حوضه مورد (Murredu) در هند مطالعه و نقاط مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی در آن حوضه تعیین شد. در این مطالعه با توجه به اطلاعات موجود از معیارهای شیب، تراکم آبراهه، ژئومورفولوژی، پوشش زمین و کاربری اراضی، شاخص رطوبت، توپوگرافی، بارش، خاک، فاصله از رودخانه و ارتفاع استفاده گردید. 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 (Shekar and Mathew, 2024). در پژوهش دیگر نیز از تلفیق همین روش‌ها برای مطالعه پتانسیل آب زیرزمینی

منطقه Mpwapwa تانزانیا استفاده شد. 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 ۲۸٪، ۳۱٪، ۱۹٪ و ۲۲٪ از منطقه به ترتیب به عنوان مناطق بسیار خوب، خوب، متوسط، فقیر و بسیار فقیر طبقه‌بندی شد (Ally et al., 2024).

در مطالعه دیگری از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی فازی (FAHP) در محیط سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی استفاده شد. در مجموع هشت لایه موضوعی مهم برای تغذیه آب‌های زیرزمینی: سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی، شیب، بارندگی، تراکم خطواره‌ها، خاک، تراکم زهکشی و کاربری اراضی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، کار میدانی و سایر تکنیک‌های مناسب تهیه و به‌عنوان ورودی مورد استفاده قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه به پنج منطقه با پتانسیل آب زیرزمینی - بسیار بالا (۴۲.۵۲٪)، بالا (۲۸.۶۷٪)، متوسط (۱۷.۲۳٪)، ضعیف (۱۰.۲۱٪) و بسیار ضعیف (۱.۳۷٪) طبقه‌بندی شد (Sarmah and Sarma, 2025).

در تمامی مطالعات فوق، تلفیق GIS و RS به‌عنوان 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 کارستی هستند. از آنجا که روش‌های مرسوم

اعتبار نقشه پتانسیل کارست کنترل می‌شود. نتایج حاصل از این مطالعه مدیریت و برنامه ریزی پایدار منابع آب زیرزمینی را تسهیل می‌کند و می‌تواند در دسترس بودن و پایداری آنها را برای نسل‌های آینده تضمین نماید.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال غربی استان کهگیلویه و بویراحمد و در حدفاصل محدوده عرض جغرافیایی سی درجه و سی دقیقه تا سی و یک درجه و دو دقیقه شمالی و طول جغرافیایی پنجاه و سه درجه و پنجاه دقیقه تا پنجاه و یک درجه و پنج دقیقه شرقی واقع شده است. این محدوده از لحاظ آب‌وهوایی غالباً تحت تأثیر جریانات مدیترانه‌ای و مرکز پرفشار جنب حاره قرار دارد و بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن محدوده مورد مطالعه جزء مناطق نیمه‌مرطوب تا مرطوب است و متوسط بارندگی حوضه‌های کارستی محدوده مطالعاتی شامل حوضه‌های کارستی سیاه، لار و نیل به ترتیب ۸۳۶، ۱۰۸۶ و ۲۰۲۵ میلی‌متر تخمین زده شده است. از لحاظ زمین‌شناسی تاقدیس‌های سیاه، لار و نیل در بخش در کمر بند چین-رانده زاگرس و در جنوب پهنه ساختاری ایزده واقع شده است. سازندهای موجود در این محدوده از قدیم به جدید شامل آهک‌های دولومیتی و مارنی نیریز، آهک‌های قهوه‌ای تا خاکستری‌رنگ سورمه-فهلپان (ژوراسیک بالا کرتاسه زیرین)، شیل‌های خاکستری با میان‌لایه‌های از سنگ‌آهک رُسی سازند گدوان، آهک اوربیتولین دار سازند داریان، شیل‌های قیری، آهک‌های رسی و مارن سازند کزدمی (کرتاسه زیرین)، آهک سروک (کرتاسه فوقانی)، رسوبات شیلی-مارنی و آهک مارنی سازندهای پابده و گورپی (کرتاسه فوقانی-پالئوسن)، آهک‌های سازند آسماری (اولیگوسن تا میوسن)، مارن قرمز و خاکستری سازند گچساران (میوسن آغازین) می‌باشد. تاقدیس سیاه با روند عمومی شمال باختری - جنوب خاوری و طولی حدود ۴۰ کیلومتر از آهک‌های سروک در هسته و شیل و مارن‌های پابده و گورپی و آهک‌های آسماری که سنی از کرتاسه میانی تا میوسن پیشین دارند تشکیل شده است. با توجه به فرسایش زیاد بر روی این تاقدیس به‌مانند اکثر

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 کهگیلویه و بویراحمد در سال ۱۳۸۵، شناسایی سازندهای کارستی استان کهگیلویه و بویراحمد 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. به عبارتی دیگر، مطالعه این منابع طبیعی به‌منظور حفاظت، برنامه ریزی و تعیین مقررات و ضوابطی برای استفاده بهینه از آنها ضروری است. پتانسیل‌یابی و همچنین مکان‌یابی از طریق تلفیق مجموعه عوامل و پارامترهای مؤثر در پیشرفت کارست صورت می‌گیرد و در نهایت محدوده‌هایی که با پتانسیل کارست شدگی 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، در این مقاله مطالعه نقشه‌برداری پتانسیل کارستی شدن منطقه وسیعی از شمال غربی استان کهگیلویه و بویراحمد را با کمک سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی ارائه می‌دهد علاوه بر این، با استفاده از داده‌های هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی،

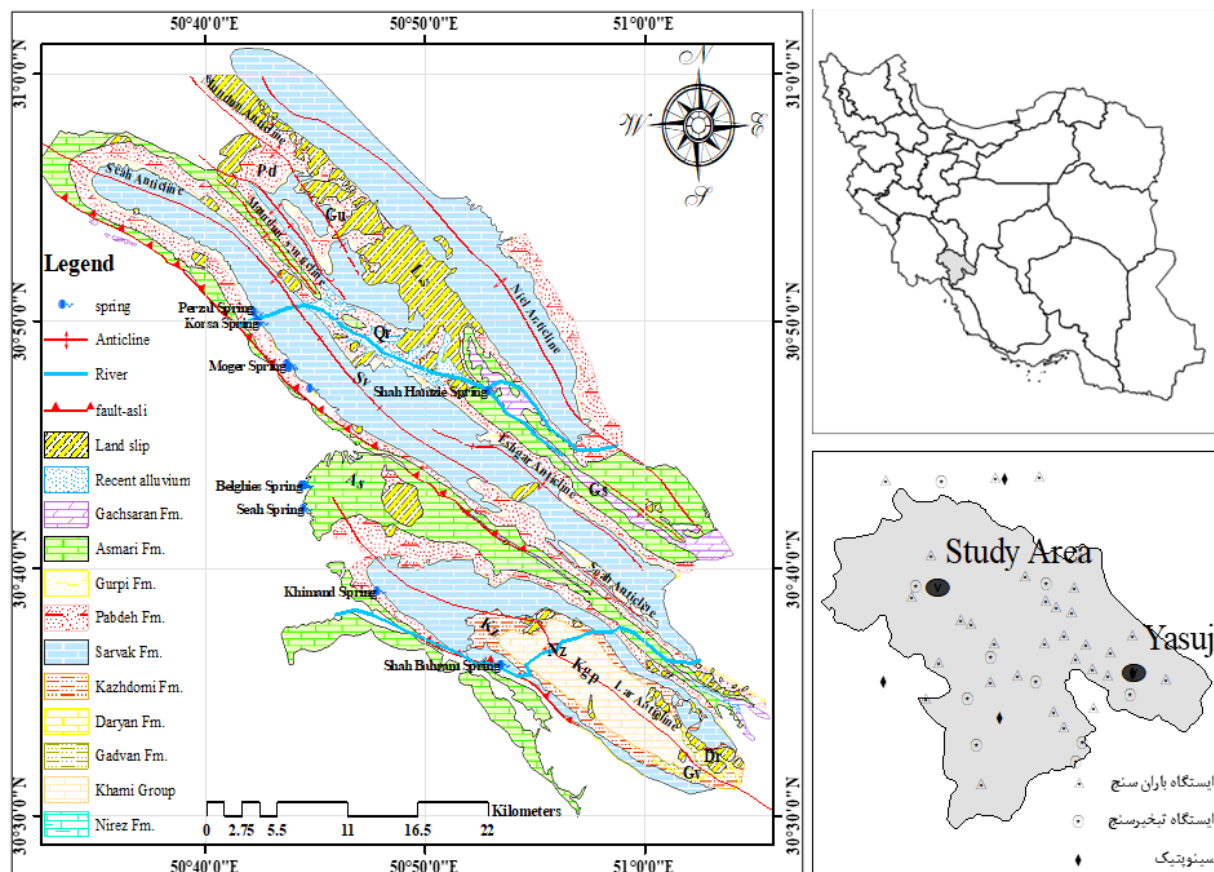
نامتقارن به طول ۳۵ کیلومتر، مرز جنوبی محدوده مطالعاتی است. امتداد کلی آن در دماغه شمال غربی N45W و در دماغه جنوب شرقی S50E می‌باشد. پوشش سطحی تاق‌دیس لار از آهک‌های سخت و مقاوم سازند سروک، آسماری، گروه خامی و شیل‌های سازند کژدومی تشکیل شده است. به صورت قراردادی، مرز آهک آسماری با سازند پابده به عنوان مرز آبخوان کارستی آرند و لار و محور تاق‌دیس لار لحاظ می‌شود. در نتیجه فعالیت شکستگی‌های عرضی، یال جنوب شرقی خورده و باعث ایجاد دره تکتونیکی کارستی و رخنمون چشمه خیمند شده است. در حقیقت چشمه خیمند مهم‌ترین تخلیه‌کننده این یال محسوب می‌شود. بیشتر یال شمال غربی تاق‌دیس لار به وسیله سازند آهکی آسماری پوشیده شده است. این سازند ارتفاعات مهمی، مانند کوه چاشت خوران را ایجاد کرده است. پلانژ شمال غربی تاق‌دیس توسط گسل خارک -میش محدود شده است و توسط دو چشمه مهم کارستی بلقیس و سیاه در پلانژ تخلیه می‌شود. راندگی پیشانی کوهستان و گسل خارک -میش، باعث تغییر ناگهانی در شیب لایه‌ها و برگشتگی آن‌ها در بعضی نواحی شده است. از طرف دیگر حضور گسل‌های طولی و عرضی متعدد ناشی از عملکرد زون برشی دهشت نیز به نوبه خود موجب ایجاد خردشدگی‌ها و شکستگی‌های فراوان در آهک‌های سروک و آسماری شده و شرایط مساعدی را برای تشکیل آبخوان‌های کارستی در این ناحیه به وجود آورده است. ظهور چشمه پرآب و شکل‌گیری دولین‌ها و شافت‌های متعدد در این محدوده مؤید همین مسئله است.

آماده کردن لایه‌های مورد نیاز

پس از تعیین مختصات نقشه زمین‌شناسی توسط نرم‌افزار ARC GIS 10.2 لایه‌های مورد نیاز به شرح زیر آماده شد:

- تهیه لایه اطلاعاتی شیب و تراکم آبراهه از نقشه رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۱۰ متر
- تهیه لایه اطلاعاتی اقلیمی شامل نقشه هم‌باران و هم‌دما از طریق برقراری روابط خطی بین اطلاعات هواشناسی و نقشه رقومی ارتفاعی (DEM).

تاق‌دیس‌های زاگرس سازنده‌ای آسماری و پابده و گورپی فرسایش یافته و آهک‌های سروک در هسته رخنمون یافته‌اند. این تاق‌دیس توسط گسل‌های عرضی در بخش مرکزی و شمالی بریده و دچار خمش شده است که در این بخش پرتگاه‌های گسلی به حالت پله‌پله را می‌توان به فراوانی مشاهده کرد. گسل پیشانی کوهستان در راستای یال جنوبی این تاق‌دیس، سبب تغییر ناگهانی در شیب لایه‌ها و برگشتگی آن‌ها در بعضی مناطق شده است. این قضیه نیز به نوبه خود موجب ایجاد خردشدگی‌ها و شکستگی‌های فراوان در آهک‌های سروک در یال جنوبی شده و شرایط مناسبی را جهت تشکیل آبخوان‌های کارستی در این ناحیه ایجاد نموده است. ظهور چشمه‌های پرآب کورسا، پیر زال و موگر و دره‌های فراوان در امتداد این راندگی مؤید همین مسئله است. تاق‌دیس نیل مرزهای شمال خاوری منطقه را پوشش داده و طول آن ۶۵ و پهنای آن ۲ تا ۴ کیلومتر است. تاق‌دیس نیل نامتقارن با محور سینوسی است و به وسیله ناودیس کوچک مندان از تاق‌دیس کوه سیاه جدا شده است. تنگه عمیقی در آن دیده نمی‌شود و روند سطح محوری آن منطبق بر روندهای ساختاری غالب منطقه می‌باشد. پیکره این تاق‌دیس از نهشته‌های آهکی سازند سروک تشکیل یافته و نهشته‌های شیلی مارنی سازنده‌ای گورپی و پابده و سازند سروک در یال‌های آن رخنمون یافته‌اند. این تاق‌دیس بسیار طویل بوده و امتداد آن تا حوضه‌های بالادست کشیده شده و به سبب کشیدگی و توسعه اشکال کارست در آن، نقش مهمی در تغذیه آبخوان و تشکیل مخازن آبی دارد. این تاق‌دیس، دارای مرتفع‌ترین نقاط در محدوده مطالعاتی می‌باشد، چنانکه ارتفاع برخی نقاط به بیش از ۳۵۰۰ متر نیز می‌رسد. این مسئله باعث گردیده تا در بیشتر مواقع از سال پوشیده از برف باشند و به همین دلیل جزء مناطق بی‌لاق‌نشین به حساب می‌آیند. شکستگی‌های ایجاد شده در این تاق‌دیس، بارش مطلوب و سازند آهک سروک شرایط مناسبی را جهت تشکیل آبخوان‌های کارستی در این ناحیه ایجاد نموده است. ظهور چشمه پرآب آبریز و تشکیل دولین‌ها و شافت‌های فراوان در این تاق‌دیس مؤید همین مسئله است. تاق‌دیس لار، تاق‌دیس دو سو مایل و



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of The Study Area

۱۹۹۹ در این روش ها تصمیم گیرنده وزن معیارها را بر اساس یک مقیاس از پیش تعیین شده تخمین می‌زند. امتیاز بیشتر برای یک معیار نشان دهنده اهمیت نسبی بالاتر آن معیار در مقایسه با سایر معیارها است. در این مورد، از نرم‌افزار کاربردی Expert Choice استفاده می‌شود. روش وزن دهی مقایسه زوجی، بخشی از روش AHP است که در سال ۱۹۸۰ توسط Saaty طرح گردید. روش AHP، یکی از تکنیک‌های کارآمد در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره می‌باشد. در روش وزن دهی 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 تعیین شده و خروجی آن وزن‌های نسبی مربوط به معیارها است (Pourakbari et al., 2020). در این تحقیق برای وزن دهی معیارها از این روش استفاده گردیده است. در این روش ابتدا سلسله مراتب مقایسه‌ها ساخته می‌شود که در بالاترین بخش هدف که در اینجا انتخاب مناطق با پتانسیل بالای کارستی است و بعد از آن پارامترهای مؤثر

- تهیه لایه اطلاعاتی لیتولوژی از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰ و ۱/۲۵۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و شرکت ملی نفت ایران
- برداشت خطواره‌ها به کمک تصاویر ماهواره‌ای ETM سنجنده لندست ۲۰۰۰ و گوگل ارث و تهیه لایه‌های اطلاعاتی تراکم خطواره و فاصله از خطواره
- تهیه لایه کاربری اراضی از نقشه کاربری اراضی ۱/۲۵۰۰۰ استان کهگیلویه و بویراحمد

روش رتبه‌بندی

ساده‌ترین روش اختصاص دادن وزن به معیارها، مرتب نمودن آنها بر اساس نظر تصمیم گیرنده می‌باشد. مرتب نمودن معیارها می‌تواند به صورت مستقیم (مهم‌ترین معیار=۱، دومین معیار=۲ و غیره) یا معکوس (کم اهمیت‌ترین 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 استفاده نمود Rank exponent و Rank reciprocal. (Malczewski, ۲۰۰۲)

پس از تهیه نقشه‌های زیر معیارهای 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 به‌دست آوردن یک مجموعه فازی، به‌روش 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 ArcGIS10.2 عملگرهای فازی مختلفی وجود دارد، به‌طور کلی پنج عملگر AND فازی، OR فازی، حاصل ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و عملگر گاما فازی در نرم‌افزار ArcGIS10.2 وجود دارد، که در این تحقیق از عملگر عطفی فازی (AND) استفاده شده است. این عملگر در مطالعات زیادی به‌عنوان 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 است و زمانی استفاده می‌شود که دو یا چند معیار با هم می‌توانند به حل یک مسئله کمک کنند و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\text{combratio}} = \min(\mu_A, \mu_B, \dots) \quad (4)$$

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 محافظه کارانه 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). سپس با تلفیق آن‌ها به‌روش بیان شده پتانسیل کارست منطقه تهیه گردید.

در تصمیم‌گیری است. سپس پارامترها در این مرحله به‌روش دو به دو با یکدیگر مقایسه و امتیازدهی می‌شوند در این تحقیق از روش مقایسه زوجی عددی برای امر وزن دهی بین معیارها استفاده شده است. در این‌گونه مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های کارشناسی استفاده می‌کنند (در این تحقیق مقایسه‌ها به‌کمک قضاوت‌های کارشناسان منابع آب شرکت آب منطقه‌ای، اساتید و دانشجویان دکتری هیدروژئولوژی دانشگاه شهید چمران اهواز (جامعه آماری ۵۰ نفر) صورت گرفت)، به‌گونه‌ای که اگر عنصر i با عنصر j مقایسه شود تصمیم‌گیرنده خواهد گفت که اهمیت i بر j یکی از حالات جدول ۱ می‌باشد (Karimi Vardanjani, 2010). در حین مقایسه زوجی برای هر مجموعه، شاخص سازگاری تصمیم توسط نرم‌افزار به‌دست می‌آید. نرخ سازگاری در روش AHP شاخصی است که سازگاری مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. این نرخ گویای درجه صحت و دقت ارزش‌گذاری‌ها در مقایسات زوجی است، به‌طوری‌که اگر نرخ مذکور برابر و کمتر از $0/1$ باشد می‌توان ارزش‌گذاری‌ها و قیاسات را خوب و صحیح دانست، در غیر این صورت ارزش‌گذاری و مقایسات زوجی باید دوباره انجام‌گرفته یا اصلاح شود (Pereira et al., 1993). نرخ سازگاری از طریق محاسبه شاخص سازگاری (CI^1) و معادله زیر حاصل می‌شود:

$$CI = \frac{\sum \lambda_{\max} - n}{n(n-1)} \quad (1)$$

در این معادله $\lambda_{\max}$ عنصر بردار ویژه و n تعداد معیارها است. عنصر بردار ویژه از معادله ۲ به‌دست می‌آید:

$$\lambda_{\max} = \frac{\text{وزن معیار} / (\text{سطر ماتریس ارزش گذاری} \times \text{ستون وزن‌ها})}{n} \quad (2)$$

موردنیاز دیگر شاخص تصادفی (RI^2) است که متناسب با تعداد معیارها به‌دست می‌آید و نهایتاً نرخ سازگاری از معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

روش تلفیق فازی

1- Consistency Index

2- Random Index

جدول ۱. مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی (Ghodsipour, 2011)
 Table1. Preference values for pairwise comparisons (Ghodsipour, 2011)

مقدار عددی Numerical value	ترجیحات (قضاوت کارشناسی) Preferences (expert judgment)
	کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر
9	(Extremely preferred) Completely preferable or completely more important or completely more desirable
7	(Very strongly preferred) ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی Very strong preference or importance or desirability
5	(Strongly preferred) ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی Strong preference or importance or desirability
3	(Moderately preferred) کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر Slightly preferable or slightly more important or slightly more desirable
1	(Equally preferred) ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان Same preference or importance or desirability
2,4,6,8	ترجیحات بین فواصل فوق Preferences between the above intervals

جدول ۲. ارزش‌های داده‌شده به لایه‌های موردنظر (بر اساس نظرات کارشناسی)
 Table 2. Values given to the desired layers (Based on expert opinions)

رتبه‌بندی Ranking	پارامتر Parameter	رتبه‌بندی Ranking	پارامتر Parameter
	تراکم آبراهه (درصد) Watercourse density (percentage)		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)
2	0-25	1	<1200
4	25-50	3	1200-1450
7	50-75	5	1450-1700
9	75-100	7	1700-2000
	دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (C)	9	>2000
9	$5 \geq$		تراکم خطواره (درصد) Line density (percentage)
7	10-5		0-25
5	15-10	2	25-50
3	20-15	4	50-75
1	$20 \leq$		75-100
	کاربری اراضی Land use	7	ارتفاع (متر) Altitude (m)
9	Dense forest	9	
7	Semi-dense forest		

5	Sprawling forest	9	$1000 \geq$
4	Rainy grassland	7	1500-1000
6	Semi-dense grassland	4	2000-1500
8	Dense grassland	2	2000-2500
2	Irrigated agriculture and orchards	1	>2500
لیتولوژی Lithology		شیب (درجه) Slope (degrees)	
9	Sarvak/Asmari	9	≤ 5
9	Gachsaran	7	5-10
1	Pabdeh/Gurpi/Kzhdemi/Gedun	5	10-15
1	Alluvial	3	15-35
5	Khami Group	1	≥ 35
6	Darian		
3	Neyriz		

جدول ۳. ماتریس وزن نهایی معیارهای مورد استفاده در تهیه مدل توسعه کارست

Table 3. Final weight matrix of criteria used in preparing the karst development model

سازند Formation	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	وزن Weight
لیتولوژی (۱) Lithology (1)	1	3	4	5	6	7	8	9	0/387
چگالی خطواره (۲) Fracture density (2)		1	2	3	4	5	6	7	0/209
بارش (۳) Precipitation (3)			1	2	3	4	5	6	0/144
ارتفاع (۴) altitude (4)				1	2	3	4	5	0/098
کاربری اراضی (۵) Land use (5)					1	2	3	4	0/066
دما (۶) Temperature (6)						1	2	3	0/044
چگالی نفوذ (۷) Infiltration Density (7)							1	2	0/031
شیب (۸) Slope (8)								1	0/022

نسبت سازگاری: ۰/۰۲

Compatibility ratio: 0.02

نقشه‌های معیار، وزندهی و تلفیق در محیط ArcGIS10.2 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 پتانسیل یابی توسعه کارست

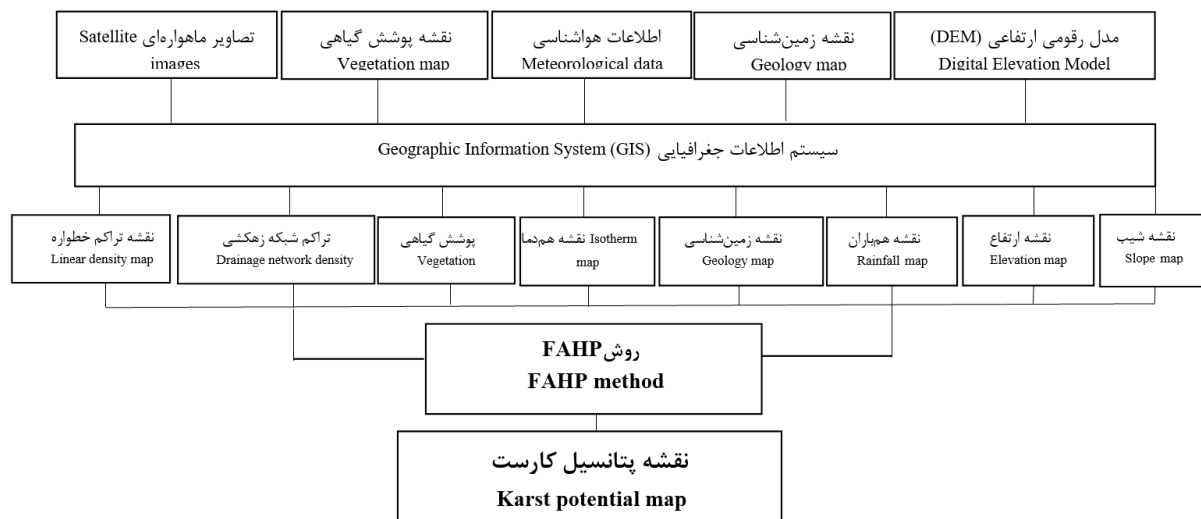
تهیه لایه‌های اطلاعاتی و اجرای مدل مورد نظر

به منظور پتانسیل یابی توسعه کارست در سازندهای شمال غربی استان کهگیلویه و بویراحمد مراحل تعیین عوامل مؤثر، تهیه ی نقشه‌های معیار، هم مقیاس سازی

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 30×30 متر برای همه ی نقشه ها انتخاب شد.

در شمال غربی استان کهگیلویه و بویراحمد گردید. داده های مورد نیاز برای تهیه نقشه های معیار از منابع مختلف (نظیر سازمان هواشناسی، سازمان زمین شناسی، سازمان نقشه برداری، تصاویر هوایی و...) و با فرمتهای گوناگون جمع آوری شده است. دادههای صحرایی و نقشه های مورد نیاز رقومی سازی شده و سپس به محیط ArcGIS10.2 منتقل شده اند. سپس تمامی داده ها به یک سیستم تصوی (UTM) و یک سیستم مرجع (WGS 84) منتقل شدند. مهمترین عوامل مؤثر در پتانسیل یابی توسعه کارستدر سازندهای منطقه مورد مطالعه عبارتند از: لیتولوژی، تراکم گسل، بارش، ارتفاع، تراکم پوشش گیاهی (کاربری اراضی)، دما، شیب و تراکم نفوذ. با



شکل ۲. نمودار گردش مراحل تهیه نقشه پتانسیل کارست

Fig 2. Flowchart of The Steps For Preparing A Karst Potential Map

$P = 0.722 h - 17.5$) و بدین ترتیب نقشه بارندگی محدوده مطالعاتی تهیه شد (شکل ۳). نکته مهم در خصوص لایه بارش قابل توجه است، این است که با افزایش ارتفاع و میزان بارش، نوع بارش عموماً برف است این موضوع باعث افزایش ارزش وزن دهی بارشهای بیشتر در منطقه شده است.

دما

در بررسی و تجزیه و تحلیل پارامتر درجه حرارت، جهت تعیین رابطه درجه حرارت- ارتفاع محدوده مطالعاتی، از آمار متوسط دمای روزانه سالهای آماری ۱۳۶۱ تا ۱۴۰۱ مربوط به ۳۵ ایستگاه هواشناسی استان کهگیلویه و بویراحمد استفاده شده است. نظیر بارش، در اینجا نیز از

نتایج و بحث

لایه بارندگی

وجود آب فاکتور اصلی اقلیمی در توسعه کارست و اصلی ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش می باشد. به کمک ۳۵ ایستگاه هواشناسی استان کهگیلویه و بویراحمد (شکل ۱) و با استفاده از ارتفاع و آمار بارندگی ۴۰ ساله (۱۴۰۱-۱۳۶۱) مربوط به ایستگاههای باران سنج نزدیک محدوده مطالعاتی، گرادیان بارندگی در محیط نرم افزار Microsoft Excel 2023 به دست آمده و در مرحله بعد جهت بسط این منحنی به کل منطقه مدل رقومی ارتفاع شده است (شکل ۴). در نهایت گرادیان بارندگی P (in mm) حاصل بر مدل رقومی ارتفاع h (in m) اعمال شد

بیشتری جهت تماس با محیط و نفوذ را دارد، درحالی‌که در مناطق با شیب زیاد جریان رواناب راحت‌تر صورت می‌گیرد و این امر باعث کاهش نفوذ آب باران می‌شود (Matiee, 1995). نقشه شیب منطقه مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاعی و با استفاده از نرم‌افزار GIS تهیه شده است (شکل ۷).

نفوذپذیری (معکوس تراکم آبراهه)

نمایه تراکم نفوذ، یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر روی منابع آب زیرزمینی و زهکشی سطحی می‌باشد. تراکم شبکه آبراهه رابطه معکوسی بانفوذ آب حاصل از بارش و کنترل عمده‌ای بر تغذیه آب‌های زیرزمینی دارد. به عبارت دیگر، در مناطق کارستی هرچه تراکم آبراهه کمتر باشد میزان نفوذ بیشتر و برعکس نیز صادق است. در این پژوهش با استفاده از نقشه DEM منطقه و به کمک نرم‌افزار ArcGIS10.2 اقدام به آماده‌سازی لایه تراکم نفوذ (معکوس تراکم آبراهه) شد (شکل ۸).

زمین‌شناسی

به علت تأثیرگذاری شدید نوع سازند بر نفوذ آب و قابلیت متفاوت حفظ آب در سازندهای مختلف این نمایه مد نظر قرار گرفته است. این لایه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ و ۱/۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و شرکت ملی نفت ایران تهیه شده است (شکل ۹).

پوشش گیاهی

پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه به صورت ترکیبی از جنگل‌های انبوه، جنگل‌های نیمه انبوه، جنگل‌های تنک، زراعت آبی و باغات، مراتع کم‌تراکم، مراتع نیمه متراکم و مراتع متراکم می‌باشد (شکل ۱۰). پوشش گیاهی نقش قابل توجهی را در توسعه کارست ایفا می‌کند (Chen et al., 2001). مواد سطحی و الگوی پوشش گیاهی میزان نفوذ و رواناب سطحی را کنترل می‌کند (Danesh Kumar et al., 2007). در مناطقی که پوششی از خاک بر روی سطح سنگ وجود دارد، به علت وجود CO_2 در ترکیب خاک که حاصل تجزیه گیاهان می‌باشد، آب حاصل از بارندگی می‌تواند ترکیب اسیدی پیدا کرده و انحلال توده آهکی را افزایش دهد. در مناطق جنگلی به علت وجود برگ گیاهان،

مدل رقومی ارتفاع منطقه استفاده گردید و با اعمال رابطه ارتفاع (h in m) - درجه حرارت (T in $^{\circ}C$) برای سال آبی ۱۴۰۱-۰۲ بر روی DEM حاصله، مدل رقومی درجه حرارت ($T = -0.0075h + 23.4$) محدوده مطالعاتی در سال‌های آبی مذکور تهیه شد (شکل ۵). نقش دما بیشتر در رابطه با آب مطرح است، به طوری‌که هر چه دمای محیط پایین‌تر باشد، به همان میزان دمای آب نیز کاهش پیدا خواهد کرد. با کاهش دمای آب مقدار جذب دی‌اکسید کربن بیشتر و در نتیجه شرایط برای انحلال بیشتر فراهم خواهد شد (Ford and William, 2007).

خطواره

خطواره‌ها سیمای خطی طویل، باریک و نسبتاً مستقیم ناشی از تکنیک هستند که بر روی تصاویر ماهواره‌ای به طور کامل از اشکال پیرامون خود متمایز بوده و منعکس‌کننده اطلاعات مهمی در مورد عوارض سطحی و زیرسطحی هستند. این سیمای نشان‌دهنده نفوذپذیری ثانویه محیط‌های آهکی بوده و بنابراین نقش مؤثری در فرآیند کارستی شدن ایفا می‌کنند (Degan et al., 2009). جهت برداشت خطواره‌های منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست حسگر ETM+ استفاده شده است. به همین منظور، لایه تراکم خطواره‌ها با اعمال فیلترهای جهتی بر باندهای ۷، ۴ و ۱ تصویر ماهواره‌ای لندست سنجنده (ETM+) در نرم‌افزار ENVI 4.7 تهیه و پس از تصحیح و حذف خطاهای موجود (امتداد جاده‌ها، مرز زمین‌های کشاورزی، خط‌الرأس کوه‌ها)، نقشه خطواره‌های منطقه تهیه گردید. در این مطالعه از نقشه حاصل لایه تراکم منطقه در محیط GIS تهیه گردید. تأثیر لایه تراکم خطواره‌ها با توجه به ماهیت این عامل کاملاً مشخص می‌باشد، به طوری‌که هرچه تراکم خطواره‌ها بیشتر باشد احتمال کارستی شدن بالاتر خواهد بود. این خطواره‌ها که نشان‌دهنده گسل‌ها و شکستگی‌های عرضی (عمود بر محور تاق‌دیس) هستند نقش مهمی در ارتباط کانال‌های انحلالی ایفا می‌کنند (Cherchi et al., 2010).

شیب

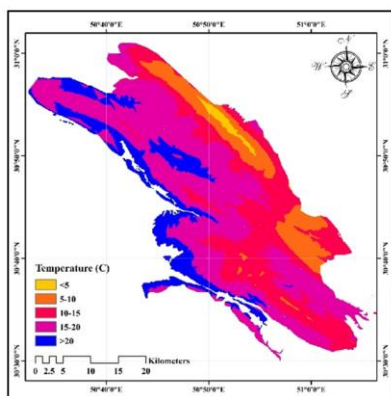
شیب نقش مهمی در سرعت جریان آب ایفا می‌کند. این عامل نفوذ آب به درون زمین را کنترل می‌کند. در مناطقی که شیب ملایم است، رواناب سطحی فرصت

روابط غیرمستقیم و یا با استفاده از عوامل دیگر نشان داده می‌شود. به‌طور کلی، توپوگرافی نقش کلیدی در تغذیه، تخلیه و ظهور چشمه‌های کارستی بازی می‌کند. با افزایش ارتفاع در یک منطقه، به‌دلیل افزایش گرادیان هیدرولیکی، پتانسیل توسعه کارست افزایش خواهد یافت. برای تهیه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی استفاده شد. شکل ۵ نقشه هم‌ارتفاع منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

میزان هوموس خاک افزایش‌یافته و نفوذپذیری را افزایش می‌دهد. همچنین فشار ریشه گیاهان در این مناطق سبب تخریب و شکستگی سنگ‌ها شده که عامل مؤثری در افزایش میزان نفوذپذیری است. هر چه تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد، از میزان رواناب ناشی از بارندگی‌های شدید جلوگیری شده و زمان لازم جهت نفوذ ریزش‌های جوی فراهم می‌گردد.

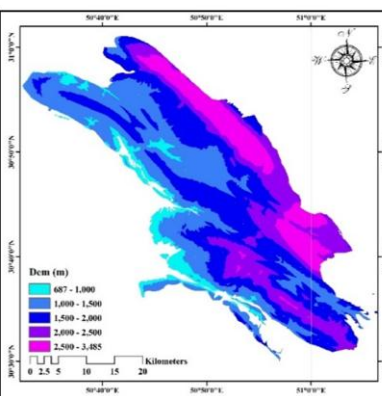
ارتفاع

ارتفاع یکی از عوامل کنترل‌کننده توسعه کارست می‌باشد. تأثیرات ارتفاعی بر روی کارستیفیکاسیون اغلب به‌شکل



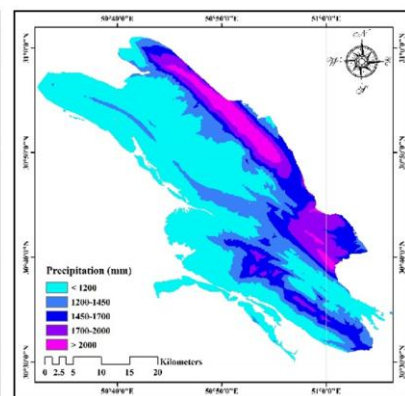
شکل ۵. لایه دما

Fig 5. Temperature Layer



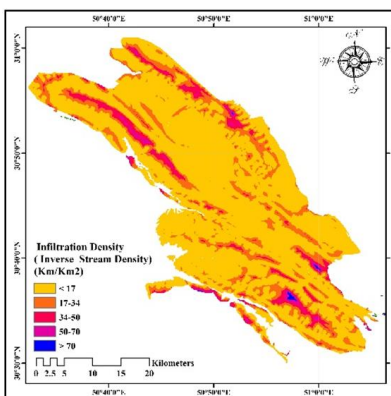
شکل ۴. لایه ارتفاع

Fig 4. DEM Layer



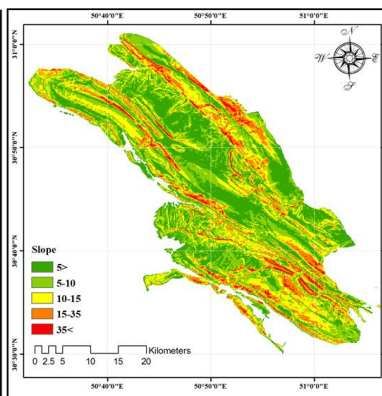
شکل ۳. لایه بارش

Fig 3. Precipitation Layer



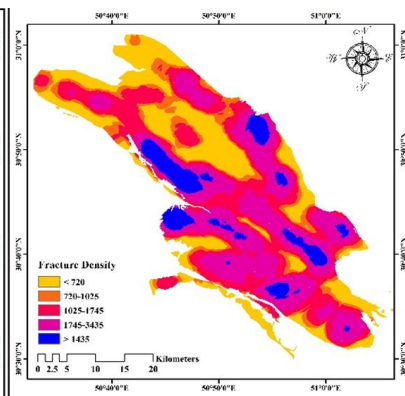
شکل ۸. لایه نفوذپذیری (معکوس تراکم آبراهه)

Fig 8. Permeability Layer
(Inverse of Waterway Density)



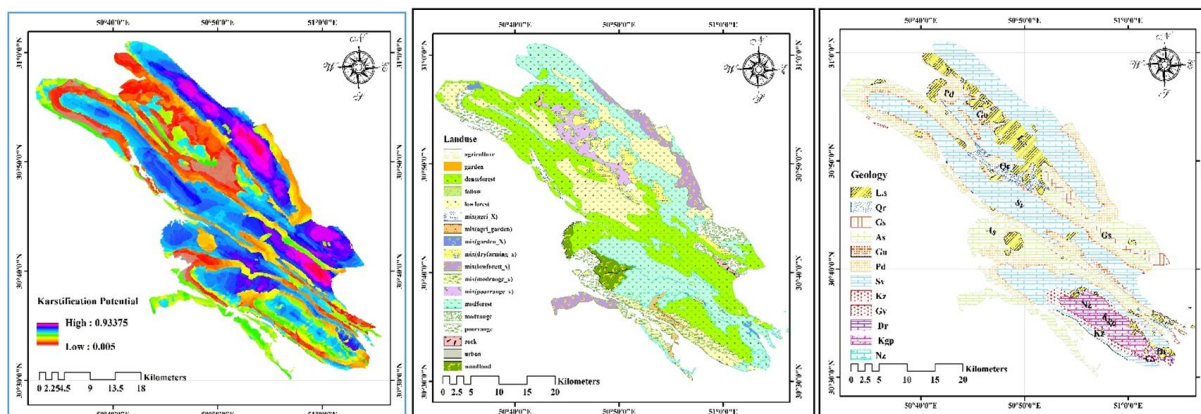
شکل ۷. لایه شیب

Fig 7. Slope Layer



شکل ۶. لایه تراکم خطواره

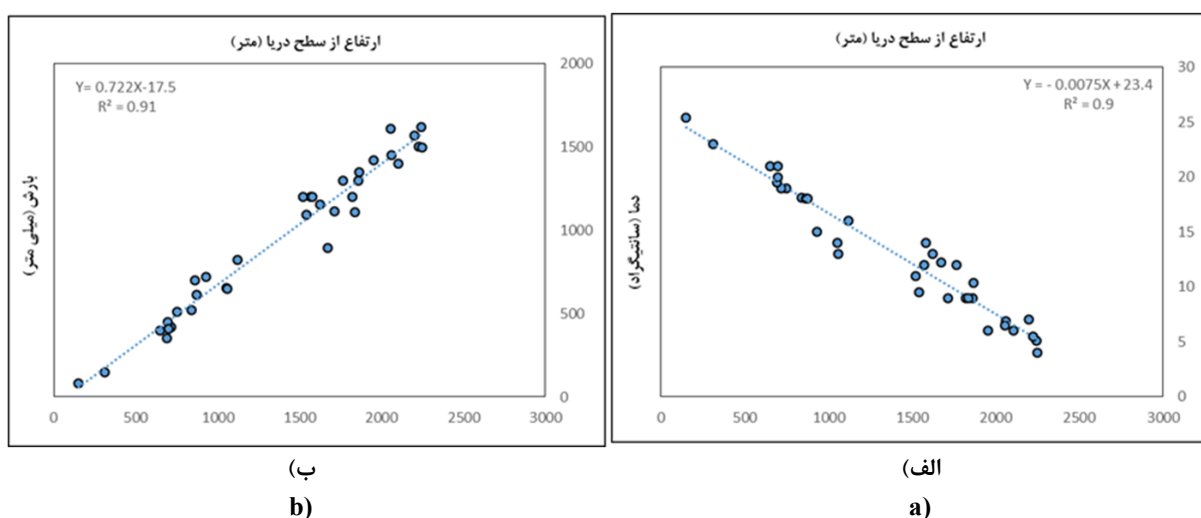
Fig 6. Fracture Density Layer



شکل ۱۱. لایه پتانسیل کارست
Fig 11. Karst Potential Layer

شکل ۱۰. لایه پوشش گیاهی
Fig 10. Vegetation Layer

شکل ۹. لایه زمین‌شناسی
Fig 9. Geological Layer



شکل ۱۲. رابطه میانگین الف) دما سالانه ب) بارش سالانه و ارتفاع ایستگاه باران‌سنج

Fig 12. Relationship Between The Average of a) Annual Temperature b) Annual Precipitation and The Height of The Rain Gauge Station

نقشه پتانسیل توسعه کارست

نقشه نهایی منطقه مورد مطالعه شامل ۵ محدوده با پتانسیل کارستی بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد می‌باشد (شکل - ۱۱). براساس این نقشه بیشترین پتانسیل کارستی شدن مربوط به بخش‌های مرکزی تاقدیس‌های نیل و سیاه و محل ظهور چشمه‌ها می‌باشد. همچنین پتانسیل کمتر غالباً مربوط به شمال غرب محدود مطالعاتی می‌باشد که در آن سازند پابده و گورپی رخنمون دارد.

صحت‌سنجی نقشه پتانسیل توسعه کارست

میزان دقت هر مدل بستگی به صحت پارامترهای مؤثر در هم‌پوشانی نهایی دارد و قابل ارزیابی است. در روش‌های

محاسبه وزن عوامل مؤثر در پتانسیل توسعه کارست

با توجه به اینکه نقشه‌های تهیه‌شده دارای مقیاس‌های مختلفی مانند متر برای فاصله‌ها، درصد برای تراکم‌ها، درجه برای شیب و غیره می‌باشند، لذا برای اینکه تلفیق آن‌ها امکان‌پذیر گردد، هم‌مقیاس‌سازی آن‌ها امری ضروری است. به همین منظور با توجه به دانش کارشناسی و با استفاده از تابع طبقه‌بندی مجدد همه‌ی نقشه‌ها در محدوده‌ی ارزش‌های ۰ تا ۹ ارزش‌دهی شدند، ارزش‌های انتخاب‌شده در جدول ۳ قابل ملاحظه می‌باشد. در گام بعد درجه ارجحیت نقشه‌های به‌دست آمده به‌کمک دانش کارشناسی مشخص و بالاترین ارجحیت و وزن دهی با توجه تنوع و نقش قابل توجه لیتولوژی در فرآیند کارستی شدن به آن اختصاص داده شد (جدول ۲).

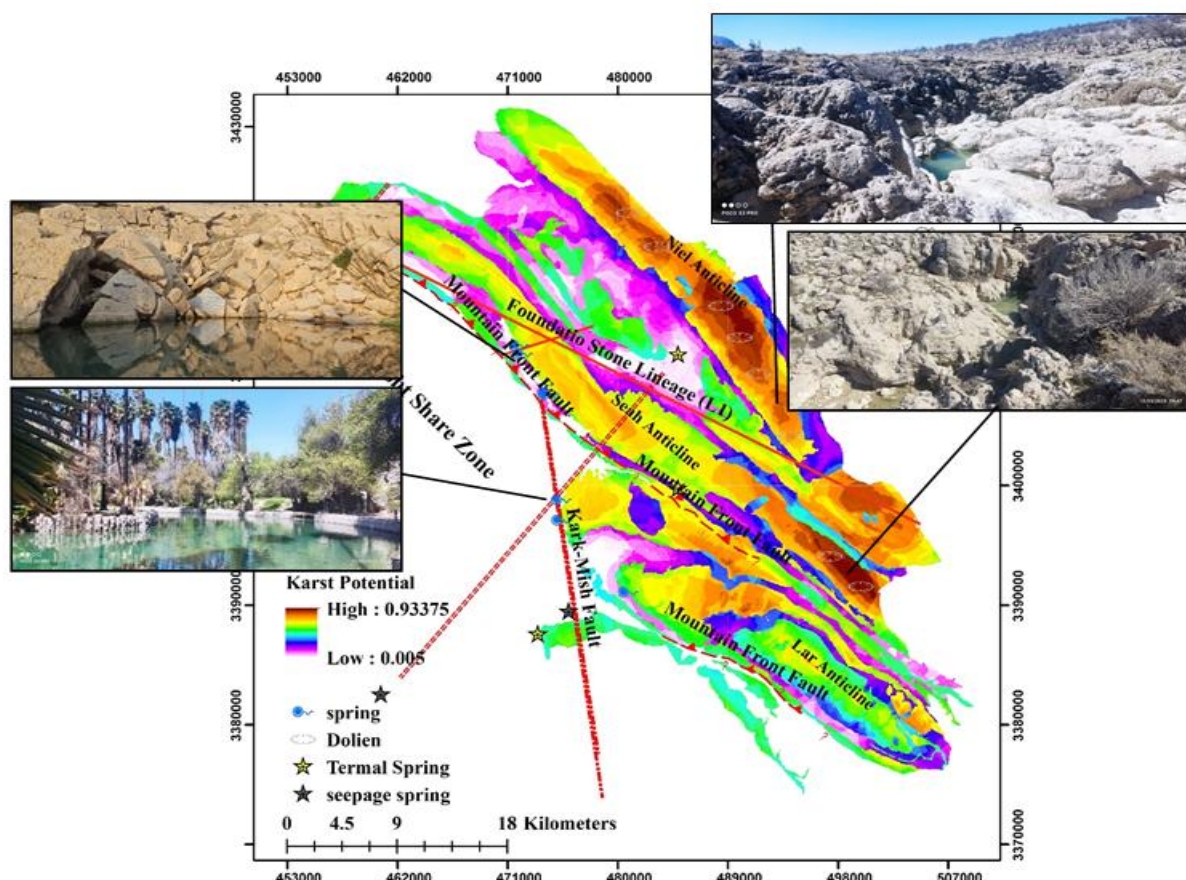
بررسی‌ها نشان می‌دهد که این وزن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده در مطالعات (Moradi et al., 2016) و (Pourakbari et al., 2020)، همخوانی مناسبی دارند ولی با نتایج به‌دست‌آمده در مطالعات (Khodakarami et al., 2022) و (Saberinasr et al., 2025) کمی تفاوت دارد. از طرفی، روش‌های مستقیم صحت سنجی مدل نیز می‌تواند به کارشناسان کمک کند.

از این‌رو، برای صحت‌سنجی نقشه نهایی ابتدا تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس در بخش مرکزی تاقدیس نیل پدیده‌های ژئومورفولوژیکی متعددی به‌شکل دولین توسعه‌یافته که این امر خود نشان‌دهنده توسعه زیاد کارست می‌باشد (شکل ۱۳).

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 زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که دو معیار لیتولوژی و چگالی خطواره به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۳۸۷ و ۰/۲۰۹ 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 شیب نیز به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۰۳۱ و ۰/۰۲۱ از اهمیت کمتری در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی برخوردار بودند.

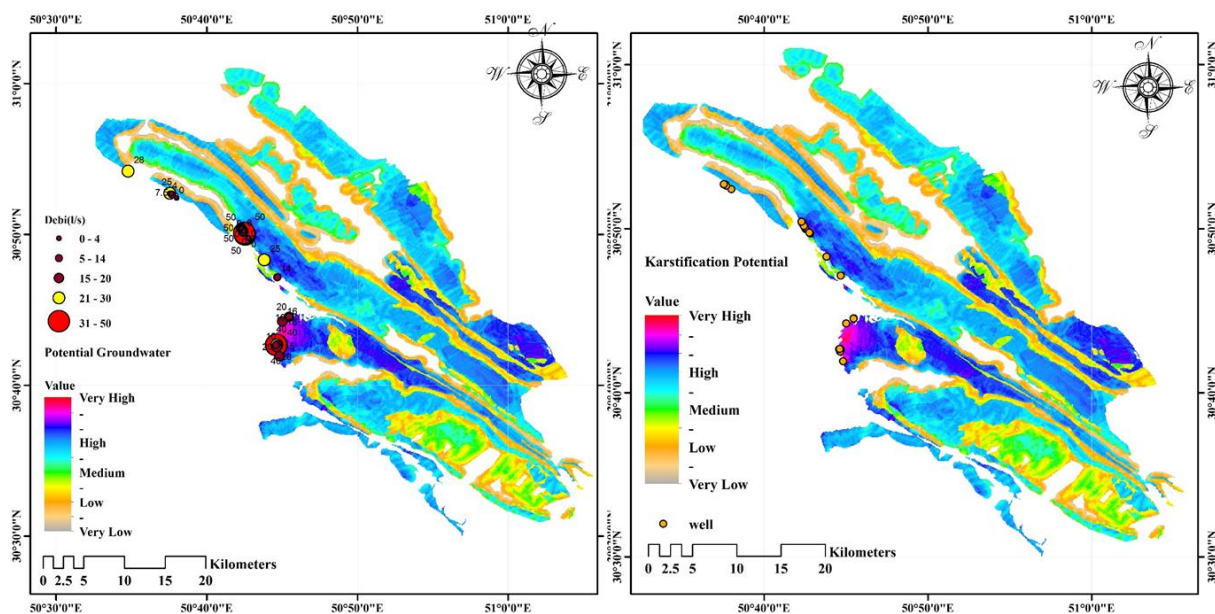


شکل ۱۳. موقعیت پتانسیل کارست، دولین‌ها و چشمه‌های موجود در تاقدیس‌ها
Fig 13. Karst Potential Location, Dolines and Springs in Anticlines

چاه‌های آهکی مورد ارزیابی قرارداد تا در نهایت بتوان ناحیه مناسب برای اکتشاف اولیه آب زیرزمینی کارست را معرفی کرد.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد، مدل فازی خروجی مناسبی را در تفکیک مناطق نشان می‌دهد.

همچنین در تاق‌دیس‌ها چشمه‌های کارستی متعددی مانند چشمه آبریز، پیر زال، کورسا، موگر، سیاه، بلقیس و خیمند با دبی بیش از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه وجود دارند که در محدوده با پتانسیل بالای کارستی شدن واقع شده‌اند. به‌طور کلی نقشه به‌دست‌آمده از مدل فازی در این تحقیق را می‌توان از لحاظ تفکیک پذیری ظاهری، تطابق با



شکل ۱۴. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی کارست تهیه‌شده با روش منطق فازی و الف) موقعیت و ب) دبی چاه‌های آهکی

Fig 14. Karst Groundwater Potential Map Prepared Using Fuzzy Logic Method and a) Location and b) Flow Rate of Limestone Wells

صحیح نمایه‌ها، شناخت نحوه تأثیر آن‌ها و انتخاب وزن‌های مناسب باشد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نقشه‌های معیار با استفاده از تابع خطی در محیط نرم افزاری ARCGIS10 استاندارد شده و ارزش‌های آن‌ها به واحدهای قابل مقایسه‌ای از صفر تا یک تبدیل شده است. به‌عبارتی دیگر بعد از استانداردسازی مجدداً امر طبقه‌بندی (reclass) صورت گرفته است و پس از اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) لایه‌های حاصله با استفاده از روش fuzzy overly تلفیق و مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی شناسایی گردیدند. نقشه نهایی نشان دهنده این است که بخش‌های شمال شرق تاق‌دیس نیل و قسمت میانه‌های تاق‌دیس سیاه و پلانژ تاق‌دیس لار به‌علت تراکم بالای گسل و شکستگی

به‌علت پمپاژ چاه‌های بهره‌براری منطقه، تفکیک آن‌ها از لحاظ اهمیت (آبدی) میسر بود. بنابراین، با توجه به گزارش‌های موجود شرکت آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد درباره میزان تخلیه، فعال و غیره فعال بودن آن‌ها، ارزیابی نتایج مدل نسبت به محل قرارگیری و دبی چاه‌های با پتانسیل منابع آب کارستی، ابتدا دو نقشه به‌دست‌آمده در مقیاس ۰-۱۰۰ استانداردسازی شدند تا مقایسه آن‌ها راحت‌تر انجام پذیرد. سپس ارزش پیکسل‌هایی که چاه‌ها در آن‌ها قرار گرفته بودند استخراج شد با مقایسه اطلاعات به‌دست‌آمده می‌توان چنین استنباط کرد که مدل توسعه کارست انطباق نسبتاً قابل‌توجهی را نشان می‌دهند (شکل ۱۴)، چراکه تقریباً تمام چاه‌های فعال با دبی بالا در بازه ارزشی بالا قرار گرفته‌اند که البته این موضوع می‌تواند بیانگر انتخاب

مناطق با توسعه یافتگی متوسط: این نواحی را می‌توان در تاقدیس‌های سیاه و لار مشاهده نمود. در این مناطق چشمه‌های کارستی با آبدهی کم تا متوسط، انواع حفره‌های انحلالی و غارچه و انواع کارن دیده می‌شود. موارد قابل بیان در ارتباط با این مناطق، رخنمون سازنده‌ای آسماری و سروک، ارتفاع بالاتر، بارش زیادتر نسبت به مناطق با توسعه یافتگی کمتر و پوشش گیاهی نسبتاً متراکم است. مناطق با توسعه یافتگی متوسط را به خود اختصاص داده و به صورت پراکنده دیده می‌شوند. به طوری که این پهنه، مساحتی در حدود ۱۸۸ کیلومترمربع که معادل با ۱۶/۴ درصد از مساحت کل می‌باشد را در مدل FAHP اشغال نموده است.

مناطق توسعه یافته: این مناطق در تاقدیس نیل و بخشی از تاقدیس‌های سیاه و لار دیده می‌شوند. در این نواحی انواع پدیده‌های کارستی شامل چشمه‌های پر آب کارستی، دولین و شافت، غار، حفره‌های انحلالی و انواع کارن مشاهده می‌شود. عوامل مؤثر در توسعه یافتگی کارست در این مناطق، سازند کربناته (سازنده‌ای آسماری، ایلام-سروک و غیره) تراکم بالای خطواره‌ها و شکستگی در این مناطق، پوشش گیاهی متراکم، ارتفاع بالاتر و در نتیجه دمای کمتر، قرار داشتن در هسته بیشینه بارش، بارش زیاد و بیشتر به صورت برف می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده شرایط برای کارستیفیکاسیون در این مناطق کاملاً مهیا می‌باشد. در مدل FAHP این مناطق به ترتیب ۲۷/۳ درصد (۳۱۳ کیلومترمربع) را به خود اختصاص داده‌اند.

روش‌های مذکور به نظر می‌رسد که به اندازه کافی برای این منظور موفق بوده و از کارایی لازم برای ارائه پیشنهادهایی در مورد مناطق بالقوه آب زیرزمینی کارست در محدوده مورد مطالعه برخوردار است. با توجه به سند چشم‌انداز منطقه و پیش بینی‌های صورت گرفته در مورد افزایش جمعیت این استان در افق ۱۴۳۰، نتایج این تحقیق به عنوان دید اولیه و همچنین دستورالعملی برای

لیتولوژی مناسب از پتانسیل کارست بالاتری برخوردار است. پتانسیل کمتر جایی اتفاق می‌افتد که سازنده‌ای نفوذناپذیری مثل پابده، گورپی، در منطقه رخنمون دارند. بر پایه نتایج حاصل از متغیرهای مؤثر در تحول و توسعه یافتگی کارست، محدوده مورد بررسی به ۴ پهنه کارست کامل توسعه یافته ((Holokarst)، کارست بینابین با توسعه متوسط عوارض کارستی (Transitional)، کارست نارس یا مناطق با توسعه کم (Merokarst) و مناطق توسعه نیافته کارستی (Non karstic) تفکیک می‌شود. درصد و مساحت زیر پوشش هر یک از پهنه‌ها در ادامه ذکر شده است. شرایط و ویژگی‌های این ۴ پهنه به شرح زیر است.

مناطق توسعه نیافته: در این مناطق هیچ‌گونه آثاری از توسعه کارست و پدیده‌های کارستی دیده نمی‌شود. رخنمون سازنده‌ای غیر آهکی گدون، پابده- گورپی و کژدمی تأثیر کم عوامل تکتونیکی، بارش و ماندگاری کم آن نسبت به ارتفاعات و پوشش گیاهی کم‌تراکم، اصلی‌ترین عوامل در توسعه نیافتگی کارست در این مناطق هستند. مساحت تحت پوشش این مناطق در مدل‌های FAHP به ترتیب ۳۱/۷ درصد (۳۶۴ کیلومترمربع) از کل محدوده مطالعاتی می‌باشد.

مناطق با توسعه یافتگی کم: این مناطق را می‌توان به صورت پراکنده در جنوب و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه و اطراف مناطق توسعه نیافته مشاهده کرد. رخنمون سازنده‌ای گروه خامی، کژدمی، آسماری و سروک کم سبتر با لیتولوژی آهک مارنی، بیشتر در نواحی میانی و جنوب غربی منطقه، ارتفاع کم و میزان بارش کم، پوشش گیاهی تنک و تأثیر کم رنگ عامل زمین‌ساخت عوامل مهم در توسعه نیافتگی کارست در این مناطق هستند. در این مناطق پدیده‌های کارستی شاخص مناطق توسعه یافته شامل دولین، غار و چشمه‌های پر آب مشاهده نمی‌شود و تنها در بخشی از این مناطق آثاری از ریل کارن دیده می‌شود. این مناطق مساحتی در حدود ۲۴/۵ درصد (۲۸۲ کیلومترمربع) را در مدل FAHP به خود اختصاص داده‌اند.

260:264–275.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.038>.

Bastani, M., Kholghi, M. & Rakhshandehroo, G.R. (2010). Inverse modeling of variable-density groundwater flow in a semi-arid area in Iran using a genetic algorithm. *Journal of Hydrogeology*, 18:1191-1203. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0599-8>.

Black, T.J. (1997). Evaporite karst of northern lower Michigan. *Journal of Carbonates and Evaporites*, 12: 81-83.

<https://doi.org/10.1007/BF03175805>.

Bonacci, O., Gottstein, S. & Roje-Bonacci, T., 2009a. Negative impacts of grouting on the underground karst environment. *Ecohydrology*, 2:492-502. <https://doi.org/10.1002/eco.90>.

Bonacci, O., Pipan, T. & Culver, D.C. (2009b). A framework for karst ecohydrology. *Journal of Environmental Geology*, 56: 891-900. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1189-0>.

Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. (2008). Water losses from the Ricice reservoir built in the Dinaric karst. *Journal of Engineering Geology*, 99:121-127. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.014>.

Calaforra, J.M. & Pulido-Bosch, A. (2003). Evolution of the gypsum karst of Sorbas (SE Spain). *Journal of Geomorphology*, 50:173–180. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00213-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00213-1).

Chen, K., Blong, R. & C. Jacobson. (2001). MCE-RISK: Integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards. *Journal of Environmental Modelling & Software*, 16: 387–397. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00006-8).

Chenini, I., Mammou, A. B., & M. E. May. (2010). Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in central Tunisia (Maknassy basin). *Journal of Water Resour Manag*, 24: 921–939. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9479-1>.

Cherchi, A., Kalantari, N., & M. R. Keshavarzi. (1990). Investigation of the Adio Karst Aquifer in the Northeast of Khuzestan Province. *Journal of Earth Science Research*, Year 1, No. 1, 84-96.

Chitsazan M., Karimi Vardanjani H., Karimi H. & Charchi, A. (2015). A comparison between karst development in two main zones of Iran: case study—Keyno anticline (Zagros Range) and Shotori anticline (Central Iran). *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1961-x>.

Chowdhury A., Jha, M. K., Chowdary, V.M. & B. C. Mal. (2009). Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1): 231–250.

<https://doi.org/10.1080/01431160802270131>.

برنامه ریزی و مکان یابی مناطق بالقوه آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق تحت تنش آبی، برای مدیران محترم شرکت آب منطقه‌ای این استان عمل خواهد کرد.

پیشنهادهات

پیشنهاد می‌شود با انجام عملیات اکتشافی ژئوفیزیک و آزمون ردیابی رنگی در موقعیت‌های محتمل بر ارتباط هیدرولیکی بین حوضه‌ای، این مسیرها و کانال‌های کارستی شناسایی شده و در انتخاب دقیق‌تر محل‌های مناسب حفر چاه‌های آب جهت تأمین آب شرب مناطق هم‌جوار مورد استفاده قرار گیرند.

منابع

Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Journal of Water Resources Research*, 45:1-16. <https://doi.org/10.1029/2008WR007615>.

Adiat, K. A. N., Nawawi, M. N. M., & K. Abdullah. (2012). Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi-criteria decision analysis as a spatial prediction tool – A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, 440: 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.028>.

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 Mpwapa District, Dodoma, Tanzania. *Geosystems and Geoenvironment*, 3 (1):100232. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100232>.

Antonakos, A., Voudouris, K. & Lambrakis, N. (2014). Site selection for drinking-water pumping boreholes using a fuzzy spatial decision support system in the Korinthia prefecture, SE Greece. *Journal of Hydrogeology*, 22: 1763-1776. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1166-5>.

Ashjari, J. & Raeisi, E. (2006). Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of Cave & Karst Studies*, 68(3): 118-129.

Ayazi, M.H., Pirasteh, S., Arvin, A.K.P., Pradhan, B., Nikouravan, B., & Mansor, S. (2010). Disasters and risk reduction in groundwater: Zagros Mountain, Southwest Iran, using geo-informatics techniques. *Journal of Disaster Advances*, 3(1):51-57.

Baghvand, A., Nasrabadi, T., Bidhendi, G. N., Vosoogh, A., Karbassi, A., & Mehrdadi, N. (2010). Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran's central desert. *Journal of Desalination*,

Manage ASCE, 126(5): 270–276.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2000\)126:5\(270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:5(270)).

Ford, D. (2007). Jovan Cvijic and the founding of karst geomorphology. *Journal of Environmental Geology*, 51:675–684.
<https://doi.org/10.1007/s00254-006-0379-x>.

Ford, D. C. & P. W. Williams. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester.

Fu Yeh, H., Sin Cheng, Y., I. Lin, H. Y. Haw Lee, Ch. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan, *Sustainable Environment Research journal*, in press.
<https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>.

Ghayoumian, J., Mohseni Saravi, M., Feiznia, S., Nourib, B. & Malekian, A. (2007). Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30:364–37.
<https://doi.org/10.1016/j.jseae.2006.11.002>.

Ghodsipour, H. (2011). *Analytical Hierarchy Process (AHP)*, Amir Kabir University of Technology Press. 9th edition, 220 p.

Goldscheider, N., Madl-Szonyi, J., Eross, A., & Schill, E., 2010. Review: thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Journal of Hydrogeology*, 18:1303–1318. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0611-3>.

Groves, C. & Meiman, J. (2005). Weathering, geomorphic work, and karst landscape evolution in the Cave City groundwater basin, Mammoth Cave, Kentucky. *Journal of Geomorphology*, 67: 115–126.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.07.008>.

Hosseini, M., Ghafouri, A.M., Amin. M.S.M., Tabatabaei, M.R., Goodarzi, M. & Abde Kolahchi, A. (2012). Effects of land use changes on water balance in Taleghan Catchment, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14:1159–1172.

Humphreys, W.F. (2006). Aquifers: the ultimate groundwater-dependent ecosystems. *Australian Journal of Botany*, 54:115–132.
<https://doi.org/10.1071/BT04151>.

Jha M. K., Chowdhury A., Chowdary V. M. & S. Peiffer. (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. *Journal of Water Resour Manag*, 21(2): 427–467. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9024-4>.

Jha, M. K., Chowdary, V. M., & A. Chowdhury. (2010). Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system, and multi-criteria decision analysis techniques. *Journal of*

Combettes, P.L. (1993). The foundations of set-theoretic estimation. *Proceedings of the IEEE*, 81(2), 182–208. <https://doi.org/10.1109/5.214546>.

Cvijic, J., 1893. Das Karstphänomen. Versuch einer morphologischen Monographie. *Journal of Geographische Abhandlungen Wien*, 5: 218–329.

De Waele, J., Plan, L. & Audra, P. (2009). Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: an introduction. *Journal of Geomorphology*, 106: 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.023>.

Degnan, J. R. & S. F. Clarck. (2002). *Fracture-correlated lineaments at Great Bay, Southeastern New Hampshire*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2-13.

Dinesh Kumar, P. K., Gopinath, G., & P. Seralathan. (2007). Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, the southwest coast of India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(24): 5583–5601.
<https://doi.org/10.1080/01431160601086050>.

Dubois, D. and Prade, H. (1985). A review of Fuzzy Set Aggregation Connectives. *Information Sciences*, 36: 85–121. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(85\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0020-0255(85)90027-1).

Dunning, D. J., Ross, Q. E., & M. W. Merkhofer. (2000). Multiattribute utility analysis for addressing Section 316(b) of the Clean Water Act. *Journal of Environmental Science & Policy*, 3: 7–14.
[https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(00\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(00)00022-8).

Echogdali, F.Z., Boutaleb, S., Bendarma, A., Saidi, M.E., Aadraoui, M., Abioui, M., Ouchchen, M., Abdelrahman, K., Fnais, M.S., & Sajinkumar, K.S. (2022). Application of Analytical Hierarchy Process and Geophysical Method for Groundwater Potential Mapping in the Tata Basin, Morocco. *Journal of Water*, 14: 2393.
<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/15/2393>.

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]

Etishree, A., Rajat, A., Garg, R. D. & Garg, P.K. (2013). Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. *Journal of Earth System Science* 122(3): 887–898.
<https://doi.org/10.1007/s12040-013-0309-8>.

Field, M.S. (2010). *Simulating drainage from a flooded sinkhole*. *Acta Carsologica*, 39: 361–378.
<https://doi.org/10.3986/ac.v39i2.105>.

Flug, M., Seitz, H. L. H., & J. F. Scott. (2000). Multicriteria decision analysis applied to Glen Canyon Dam. *Journal of Water Resour Plan*

- province, *Journal of Modarres seasonal of humanities*, 13th course 1: 272-295. [In Persian]
- Mendoza, G. A. & H. Martins. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modelling paradigms. *Journal of Forest Ecology and Management* 230 (1-3): 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.023>.
- Millanovic, P. T. (1981). *Karst Hydrogeology*. Water Resources Publication. Littleton, Colorado, USA.
- Mofidifer, M., Al-Madrasi, S.A., Islah, M. & Malekzadeh Bafghi, S.H. (2014). *Potential assessment of groundwater resources using the Analytic Hierarchy Decision Model in the GIS environment (Case study: Yazd Ardakan plain basin)*. National Conference on the Application of Advanced Spatial Analysis Models (Remote Sensing and GIS) in Land Planning. Islamic Azad University, Yazd Branch. pp. 1-10.
- Moghim, H. (2010). *Karst Hydrology*, Publication of Payam-e Noor. [In Persian]
- Mohammadi Behzad, H. R. (2011). *Identification of the source of nutrition and investigation of the physico-chemical characteristics of the Bibi Talkhon karst spring*. Master's thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz. [In Persian]
- Moradi, S., Kalantari, N., & Charchi, A. (2020). Karstification Potential Mapping in the Northeast of Khuzestan Province, Iran, using Fuzzy Logic and Analytical Hierarchy Process (AHP) techniques. *Journal of Geopersia*, 6 (2), 265-282. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2016.58671>.
- Moreno-Jimenez, J. M. (2005). *A spreadsheet module for consistent consensus building in AHP-group decision making*, Group Decision and Negotiation 14: 89-108. <https://doi.org/10.1007/s10726-005-2407-8>.
- Motiei, H. (1995). *Zagros Petroleum Geology 1 and 2*. Geological Organization of Iran Publications, 1009 pp.
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S. & Shafri, H.Z.M. (2013). Estimating groundwater vulnerability to pollution using the modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area. *Journal of Iran Environ Earth Sci*. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2690-7>.
- 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]
- Nosrati, K. & Eeckhaut, M.V.D. (2012). Assessment of groundwater quality using multivariate statistical techniques in Hashtgerd Plain, Iran. *Journal of Iran Environ Earth Sci*, *Hydrogeology*, 18(7): 1713-1728. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0631-z>.
- Johnson, S.B. & Stieglitz, R.D. (1990). Karst features of a glaciated dolomite peninsula, Door County, Wisconsin. *Journal of Geomorphology*, 4:37-54. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(90\)90025-L](https://doi.org/10.1016/0169-555X(90)90025-L).
- Joubert, A., Stewart, T. J., & R. Eberhard. (2003). Evaluation of water supply augmentation and water demand management options for the City of Cape Town. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12(1): 17-25. <https://doi.org/10.1002/mcda.342>.
- Karimi Vardanjani, H. (2010). *Karst hydrogeology: concepts and methods*. First edition, Eram Shiraz Publications, 414 pp.
- Karimi, H., Raeisi, E. & Zare, M. (2003). Hydrodynamic Behavior of the Gilan Karst Spring, West of the Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst Science*, 30 (1): 15-22.
- 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]
- Kolat, C., Doyuran, V., Ayday C. & M. Sözen. (2006). Preparation of a geotechnical microzonation model using geographic information systems based on multicriteria decision analysis. *Journal of Environmental Geology*, 87: 241-255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.005>.
- Konkul, J., Rojborwornwittaya, W. & Chotpantararat, S. (2014). Hydrogeologic characteristics and groundwater potentiality mapping using potential surface analysis in the Huay Sai area, Phetchaburi Province, Thailand. *Journal of Geosci*, 18 (1): 89-103. <https://doi.org/10.1007/s12303-013-0047-6>.
- Madrucci V., Taioli, F. & C. C. de Araújo. (2008). Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, São Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology*, 357: 153-173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.026>.
- Magnabosco, R., Galvão, P. y de Carvalho, M. (2020). An approach to map karst groundwater potentiality in an urban area, Sete Lagoas, Brazil. *Journal of Hydrogeology*, VOL. 65, NO. 14, 2482-2498. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1802031>.
- 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]
- Maleki, D., Shooohani, M., Alaeitaleghani. (2009). Zooning of Karst development in Kermanshah

- Oltu Basin, Turkey. *Journal of Water*, 17: 240. <https://doi.org/10.3390/w17020240>.
- Thirumalaivasan, D., Karmegam, M. & K.Venugopal. (2003). AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using the DRASTIC model and GIS. *Journal of Environmental Modelling & Software*, 18: 645–656. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00051-3).
- Trillas, E., Alsina, C., and Valverda, L. (1983). On some logical connectives for fuzzy set theory. *Journal of Mathematical Analysis and its Applications*, 93, 15–26.
- Vigna, B., Fiorucci, A., Banzato, C., Forti, P. & De Waele, J. (2010). Hypogene gypsum karst and sinkhole formation at Moncalvo (Asti, Italy). *Zeitschrift für Journal of Geomorphologie*, 54, 285–306.
- Yager, R.R. (1991). Connectives and quantifiers in fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 40, 39-75. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(91\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0165-0114(91)90046-S).
- 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. [https://doi.org/10.1016/0888-613X\(96\)00026-6](https://doi.org/10.1016/0888-613X(96)00026-6).
- Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzade, Y. & Kanani, R. (2011). Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Journal of Global Planet Change*, 78(3-4):137-146. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.003>.
- 65:331-344. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1092-y>.
- Pereira, J., M. & L. Duckstein. (1993). A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. *International journal of geographical information systems*, 7(5): 407–424. <https://doi.org/10.1080/02693799308901971>.
- 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 Khuzestan). *Water Resources Engineering*, 13(45), 99-112. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1399.13.45.8.1>.
- Rahmati, O. (2013). *An investigation of quantitative zonation and groundwater potential (case study: Ghorveh-Dehgolan plain)*. M.Sc. thesis, Tehran University.
- Ravbar, N., and Goldscheider, N. 2007. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Journal of Acta Carsologica*, 36: 397-411. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.174>.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill, New York, 287 p.
- 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*, 5(2), 19-40. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8583.1085>.
- Sarmah, R. K., & Sarma, S. (2025). Delineation of Potential Groundwater Zones Using GIS-based Fuzzy AHP Technique for Urban Expansion in the Southwestern Fringe of Guwahati City, India. *Journal of Nature Environment and Pollution Technology*, 24(2). <https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i02.B4233>.
- Shaban, A., Khawlie, M., & C. Abdallah. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Journal of Hydrogeol*, 14: 433–443. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100994>.
- Taşci, s., Şenocak, s., Doğru, F., Wang, B., Abdelrahman, K., Fnais, M. S., & El-Raouf, A.A. (2025). Geospatial and Multi-Criteria Analysis for Identifying Groundwater Potential Zones in the