

Groundwater Potential Assessment Using Sentinel 1 Radar Data Processing and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Technique (Case Study: the Sirjan Catchment)

Ali Mehrabi^{1*}, Sadegh Karimi², Majid Safipour³

1- Assistant Professor, Department of Geography, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(*Corresponding Author Email: mehrabi@uk.ac.ir)

2- Assistant Professor, Department of Geography, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3- MA Student of Environmental Hazards, Department of Geography, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Introduction

Groundwater resources are an important natural resource for domestic, agricultural, and industrial use. Today, due to the population growth as well as agricultural, and industrial development, the demand for groundwater use has increased dramatically. Climate changes, repeated droughts, and the risk of surface water pollution as a result of human and industrial activities are other important factors in the human interest in using groundwater resources. However, the unplanned use of groundwater disrupts the natural nutrient balance of aquifers. The accumulation and movement of groundwater in an area depend on various factors such as geology, tectonics, soil type, geomorphological characteristics of the region, drainage pattern, land use, and the relationship between such factors. The tectonic factor is one of the most important factors in the concentration of groundwater resources. Earth faults and fractures, known as tectonic faults, cause more and more surface water to penetrate into the earth's crust and feed the groundwater aquifers. Therefore, the identification of tectonic faults is one of the important cases in the study of groundwater resources. Kerman province, and especially its northern and northwestern cities, due to the increasing expansion of pistachio orchards, has faced an increase in the extraction of groundwater resources and water scarcity is one of the most important problems in the region. Sirjan city is also one of the areas that needs the identification of new groundwater resources. Therefore, in this study, an attempt has been made to process Sentinel 2 multispectral images and Fuzzy-AHP methods, which are among the multi-criteria decision analysis techniques. The maps of the various factors influencing the creation of groundwater aquifers have been prepared in the GIS environment. The maps were weighed and combined to identify suitable areas with good potential. The main difference between this method and the AHP method is the difference in the method of weighting criteria and options so that in this method, the weighting is done as fuzzy.

Methodology

The textural analysis consists of quantifying the different gray levels of the image in terms of roughness and their distribution. The contextual analysis technique makes it possible to highlight image dissimilarities or homogeneous zones. There are several methods for textural analysis including structural, statistical, study-based methods, and fractal methods. In this study, a statistical approach known as Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) proposed by Haralick (1979) was adopted. It allows the identification and selection of the parameters that best define the elements from the measurement of the gray tone distributions. The factors are the mean, variance, homogeneity, contrast, dissimilarity, entropy, second moment, and correlation. These factors have many applications in geological and topographic studies. In this study, these factors were used in the analysis of the main components and then in the filtering operation to extract tectonic faults. Lineaments are related to fractures and lithological boundaries and in some cases to geomorphic relief. Thus, lineaments appear on the image with a tonal difference. The Fuzzy-AHP method was first proposed by Chang (1996, p. 649).

Discussion

The textural analysis was performed on the Sentinel 1 radar image of the study area. The result were 8 images of different co-occurrence indices. Figure 3 in the text shows the images mean, variance, homogeneity, contrast, dissimilarity, entropy, second moment, and correlation. In order to

extract tectonic faults, the analysis of the principle components on eight co-occurrence factors was performed. Since the first principle component contains about 90% of the image information, it shows the major structural features of the image. In order to reduce the noise and increase structural information as much as possible, the first main component was multiplied. In order to extract tectonic lines, the oriented filter was applied to the conjugate image of the first main component at zero, 45, 90, and 135 degree angles. In this way, the north-south, northeast-southwest, east-west, and southeast-northwest directions were highlighted, respectively. Figure 6 in the text shows the effective factors in the potential assessment. In order to achieve the final map of the potential of groundwater resources in the fuzzy hierarchical method, each criterion must first be weighed and merged accordingly. Table 2 in the text shows the binary comparison matrix of criteria. Accordingly, the lithological criterion with a weight of 0.378 has the most effective factor and the vegetation criterion with a weight of 0.043 has the least effect on the concentration of groundwater resources. About 3 percent of the study area is in the very good category (228 square kilometers), 11 percent in the good category (836 square kilometers), 52 percent in the average category (4016 square kilometers), 29 percent in the low category (2252 square kilometers), and 5 percent in the very low category (396 square kilometers). Very good and good areas are mostly in the foothills to the highlands of the study area.

Conclusion

The results of the grey level co-occurrence matrix method show the capability of this method in extracting tectonic lines. In addition, the higher spatial resolution of the Sentinel 1 radar images than the available optical images makes the separation and detection of tectonic lines better. By combining the effective layers in the concentration of groundwater, the study area was potentialized in terms of the existence of groundwater reserves. The results show that about 14% of the study area has good potential (mostly located in foothills and within calcareous and alluvial rocks) in this area. Due to the declining quality of water resources in existing wells, the identified areas with a good and very good potential can be explored specifically for new water resources.

Keywords: Potential Assessment, Groundwater Resources, Remote Sensing, Fuzzy-AHP, Sirjan Basin.

References

- Agarwal, E., 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.
- Andualem, T. G., & Demeke, G. G. (2019). Groundwater Potential Assessment Using GIS and Remote Sensing: A Case Study of Guna Tana Landscape, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 24,100610.
- Azadikhah, A., Bouzari, S., Yassaghi, A., & Emami, M. H. (2015). Formation of Extensional Basin in Internal Part of the Zagros Orogeny in West of Sirjan, Iran. *Open Journal of Geology*, 5, 821-827.
- Baharvand, S., Rahnamarad, J., & Soori, S. (2016). Delineation of Groundwater Recharge Potential Zones Using Weighted Linear Combination Method (Case Study: Kuhdasht Plain, Iran). *Journal of Geotechnical Geology*, 12(2), 119-125.
- Celik, R. (2019). Evaluation of Groundwater Potential by GIS-Based Multicriteria Decision Making as a Spatial Prediction Tool: Case Study in the Tigris River Batman-Hasankeyf Sub-Basin, Turkey. *Water Journal*, 11, 2630.

- Cesar, S., Hedwige, C., Guimolaire, D., Ernestine, M., Etouna, J., Njandjock, P., & Nyeck, B. (2018). Radarsat-1 Image Processing for Regional-Scale Geological Mapping with Mining Vocation under Dense Vegetation and Equatorial Climate Environment, Southwestern Cameroon. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21, S43–S54.
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the Extent Analysis Method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655.
- Chang, J., Tian, J., Zhang, Z., Chen, X., Chen, Y., Chen, S., & Duan, Z. (2018). Changes of Grassland Rain Use Efficiency and NDVI in Northwestern China from 1982 to 2013 and Its Response to Climate Change. *Water Journal*, 10(11), 1-20.
- Chaudhry, A. K., Kumar, K., & Alam, M. A. (2019). Mapping of Groundwater Potential Zones Using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Geospatial Technique. *Geocarto International Journal*, 14(3), 117-127.
- Das, S. (2017). Delineation of Groundwater Potential Zone in Hard Rock Terrain in Gangajalghati Block, Bankura District, India Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4), 1589-1599.
- Domingos, P., Sangam, S., Mukand, B., & Sarawut, N. (2017). Delineation of Groundwater Potential Zones in the Comoro Watershed, Timor Leste Using GIS, Remote Sensing, and Analytic Hierarchy Process (AHP) Technique. *Journal of Applied Water Science*, 7(1), 503-519.
- Haralick, R. M. (1979). Statistical and Structural Approaches to Texture. *Proc. IEEE*, 67(5), 786–804.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J. M., & Fernandez, L. (2000). Temporal Evolution of Groundwater Composition in an Alluvial Aquifer (Pisuerga River, Spain) by Principal Component Analysis. *Journal of Water Resources*, 34, 807–816.
- Jain, A. K., & Tuceryan, M. (1992). *Texture Analysis*. Chapter 11 in the Handbook of pattern recognition and Computer Vision by C. H. Chen 1992, 315.
- Javhar, A., Chen, X., Bao, A., Jamshed, A., Yunus, M., Jovid, A., & Latipa, T. (2019). Comparison of Multi-Resolution Optical Landsat-8, Sentinel-2, and Radar Sentinel-1 Data for Automatic Lineament Extraction: A Case Study of Alichur Area, SE Pamir. *Remote Sensing Journal*, 11, 778-789.
- Jenifer, M. A., & Jha, M. K. (2017). Comparison of Analytic Hierarchy Process, Catastrophe and Entropy Techniques for Evaluating Groundwater Prospect of Hard-Rock Aquifer Systems. *Journal of Hydrology*, 548, 605-624.
- Khosroshahzadeh, S., Pourkermani, M., Almasian, M., Arian, M., & Khakzad, A. (2016). Lineament Patterns and Mineralization Related to Alteration Zone by Using ASAR-ASTER Imagery in Hize Jan-Sharaf Abad Au-Ag Epithermal Mineralized Zone (East Azarbaijan—NW Iran). *Open Journal of Geology*, 6(4), 232-250.
- Lee, S., & Lee, C. W. (2015). Application of Decision-Tree Model to Groundwater Productivity Potential Mapping. *Journal of Sustainability*, 7, 13416–13432.
- Masoumi, F., Eslamkish, T., Abkar, A. A., Honarmand, M., & Harris, J. R. (2017). Integration of Spectral, Thermal, and Textural Features of ASTER Data Using Random Forests Classification for

Lithological Mapping. *Journal of African Earth Sciences* 129, 445-457.

- Oh, H., Kim, Y., Choi, J., Park, E., & Lee, S. (2011). GIS Mapping of Regional Probabilistic Groundwater Potential in the Area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399(3-4) 158-172.
- Pourtaghi, Z. S., & Pourghasemi, H. R. (2014). GIS-based Groundwater Spring Potential Assessment and Mapping in the Birjand Township, Southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 22(3), 643-662.
- Rajasekhar, M., Raju, G. S., Sreenivasulu, Y., & Raju, R. S. (2019). Delineation of Groundwater Potential Zones in Semi-arid Region of Jilledubanderu River Basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using Fuzzy Logic, AHP, and Integrated Fuzzy-AHP Approaches. *Hydro Research*, 2, 97-108.
- Sukumar, M., & Selva, M. S. (2015). Discriminating Lineaments from the Aster Image by Analyzing the Object Properties. *International Journal of Advanced Technology Energy Sciences*, 3(1), 2348-7550.
- Tseng, M. L., Lin, Y. H., Chiu, A. S. F., & Chen, C. Y. (2008). Fuzzy AHP Approach to TQM Strategy Evaluation. *IEMS Journal*, 7(1), 34-43.





جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۱، پیاپی ۷۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صص ۲۴-۱

نوع مقاله: پژوهشی

وصول: ۱۳۹۹/۱/۳۱ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۷

ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از پردازش داده‌های راداری سنتینل ۱ و

تکنیک آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA)

نمونه پژوهش: حوضه آبریز سیرجان

علی مهرابی^{*}، استادیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

mehrabi@uk.ac.ir

صادق کریمی، استادیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

karimi@uk.ac.ir

مجید صفی‌پور، دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

safipour@gmail.com

چکیده

حوضه آبریز سیرجان واقع در استان کرمان، یکی از مناطق درگیر با بحران کم‌آبی است. هدف از این پژوهش، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در این حوضه با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS است. در این پژوهش به‌منظور شناسایی خطواره‌های تکنونیک، یکی از عوامل مهم در تشکیل منابع آب زیرزمینی، از تصاویر راداری سنتینل ۱ استفاده شد. در این زمینه با انجام آنالیز بافت و تهیه پارامترهای مربوط به ماتریس هم‌رویداد گام‌های خاکستری، شامل میانگین، واریانس، یکنواختی، تباین، اختلاف، آنتروپی، موقعیت ثانویه و همبستگی، مؤلفه‌های اصلی مربوط تهیه شد؛ سپس با اعمال فیلترهای جهت‌دار روی تصویر مؤلفه اصلی ۱، تعداد ۳۸۹ خطواره تکنونیک بارزسازی شد. به‌منظور پتانسیل‌یابی منابع آبی جدید، عوامل مختلف هیدرولوژی و هیدروژئولوژیکی مؤثر بر تشکیل منابع آب زیرزمینی شامل لایه تراکم خطواره‌های تکنونیک، بارندگی، تراکم آبراهه‌ای، سنگ‌شناسی، شیب و پوشش گیاهی در محیط GIS تهیه شد. پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی براساس روش Fuzzy-AHP، لایه‌های مدنظر وزن‌دهی و تلفیق شد؛ در نتیجه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حوضه سیرجان تهیه شد.

براساس نتایج، محدوده پژوهش به‌لحاظ پتانسیل آب زیرزمینی به پنج منطقه خیلی خوب (۲۲۸ کیلومتر مربع)، خوب (۸۳۶ کیلومتر مربع)، متوسط (۴۰۱۶ کیلومتر مربع)، ضعیف (۲۲۵۲ کیلومتر مربع) و خیلی ضعیف (۳۹۶ کیلومتر مربع) تقسیم می‌شود. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج از داده‌های ۳۰ چاه مشاهده‌ای استفاده شد. براساس ماتریکس خطای تهیه‌شده، صحت نتایج به‌دست‌آمده بر مبنای دبی و شوری به ترتیب ۸۳/۳۳ درصد و ۷۳/۳۳ درصد برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل‌یابی، منابع آب زیرزمینی، سنجش از دور، Fuzzy-AHP، حوضه سیرجان

*نویسنده مسئول

مقدمه

منابع آب زیرزمینی، یکی از منابع طبیعی مهم برای استفاده در مصارف خانگی، کشاورزی و صنایع است. امروزه به دلیل رشد جمعیت، گسترش کشاورزی و صنعت، تقاضای استفاده از آب زیرزمینی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. تغییرات آب‌وهوایی، خشکسالی‌های پی‌درپی و خطر آلودگی آب‌های سطحی در نتیجه فعالیت‌های انسانی و صنعتی، از دیگر عوامل مهم در علاقه بشر به استفاده از منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود (صداقت، ۱۳۸۵: ۱۳۰)؛ با این حال استفاده بدون برنامه‌ریزی از آب‌های زیرزمینی تعادل تغذیه طبیعی سفره‌های آب را مختل می‌کند. تجمع و حرکت آب‌های زیرزمینی در یک منطقه تابع عوامل مختلفی نظیر زمین‌شناسی، تکتونیک، نوع خاک، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه، الگوی زهکشی و کاربری زمین و ارتباط بین این عوامل است (قربانی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶: ۶۲).

عامل تکتونیک، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تمرکز منابع آب زیرزمینی است. گسل‌ها و شکستگی‌های سطح زمین با عنوان «خطواره‌های تکتونیک» موجب نفوذ هرچه بیشتر آب‌های سطحی به درون لایه‌های زمین و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی می‌شوند؛ از این رو شناسایی خطواره‌های تکتونیک، یکی از عوامل مهم در بررسی منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود.

تاکنون پژوهش‌های سنجش از دور زیادی در زمینه شناسایی این عامل انجام گرفته است (Sukumar and Selva, 2015: 34; Khosroshahizadeh et al., 2016: 232; Javhar et al., 2019: 778) که تقریباً تمامی آنها از تصاویر چندطیفی و نوری برای بارسازی ساختارهای تکتونیک استفاده کرده‌اند. از آنجایی که مطالعات جدید نشان‌دهنده بیشتر بودن دقت داده‌های راداری در بررسی خطواره‌های تکتونیک است (Cesar et al., 2018: 43)، در این پژوهش از این تصاویر برای شناسایی و بررسی شکستگی‌ها و گسل‌های منطقه مدنظر استفاده شد.

تاکنون روش‌های مختلفی برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شده است؛ مانند روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) (Helena et al., 2000: 807)، روش درخت تصمیم (Lee and Lee, 2015: 13416) و مدل رگرسیون خطی (Pourtaghi and Pourghasemi, 2014: 643) که بیشتر مبتنی بر تکنیک‌های آماری چندمتغیره‌اند. تکنیک آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره، یکی از روش‌های ساده، مؤثر، شفاف و قابل اعتماد به‌منظور تلفیق عوامل مختلف برای اهداف خاص در نظر گرفته می‌شود (Jenifer and Jha, 2017: 605).

پژوهشگران زیادی از GIS برای تشخیص مناطق دارای پتانسیل مناسب آب زیرزمینی در مناطق خود استفاده کرده‌اند؛ از جمله:

آبشیرینی و همکاران (۱۳۸۷) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی را در محدوده طاق‌دیس پابده با استفاده از روش هم‌پوشانی شاخص وزنی در محیط GIS انجام داده‌اند. عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی در این پژوهش، نوع سازندهای زمین‌شناسی، میزان شکستگی‌ها، وضعیت زهکشی، ارتفاع و شیب منطقه در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده دقت زیاد روش یادشده در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی است؛ ولی یکی از نقایص این پژوهش، لحاظ نکردن لایه بارندگی در کار است.

صابری و همکاران (۱۳۹۱) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی را در طاق‌دیس کمستان استان خوزستان به روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام دادند. براساس نتایج به‌دست‌آمده حدود ۵۰ درصد از مساحت منطقه برای استخراج آب زیرزمینی پتانسیل خیلی زیاد و زیاد، و روش استفاده‌شده با وجود کارایی خوب به دلیل لحاظ‌نکردن میزان تأثیر متفاوت درون‌لایه‌ای هریک از عوامل به‌تنهایی دقت کمی دارد.

رحیمی و موسوی (۱۳۹۲) منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز شاهرود- بسطام را با استفاده از تکنیک‌های GIS پتانسیل‌یابی کردند. نتایج کار آنها نشان‌دهندهٔ زیادبودن پتانسیل استخراج منابع آب زیرزمینی از مخروط‌افکنه‌های هولوسن و رسوبات درشت‌دانهٔ کواترنری موجود در محدودهٔ پژوهش است.

مفیدی‌فر و همکاران (۱۳۹۳) منابع آب زیرزمینی حوضهٔ یزد- اردکان را با استفاده از روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله‌مراتبی پتانسیل‌یابی کردند. براساس نتایج پژوهش آنها، حدود ۷۰ درصد از مساحت منطقه پتانسیل خیلی خوب و خوب به‌لحاظ آب زیرزمینی دارد.

رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۵) حوضهٔ آبریز منتهی به دشت تبریز را به‌لحاظ منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل شبکه پتانسیل‌یابی کردند. براساس نتایج، دو عامل بارش و زمین‌شناسی بیشترین نقش را در پتانسیل‌یابی منابع آب منطقه دارد و پهنه‌های با پتانسیل زیاد آب زیرزمینی بر رسوبات کواترنری و ارتفاعات پایین منطبق است؛ متأسفانه در این پژوهش، عامل خطواره‌های تکتونیکی و وضعیت شکستگی‌های منطقه به‌خوبی بررسی نشده است. قربانی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل نسبت فراوانی در محیط GIS، مدلی قابل اعتماد در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت ازنا- الیگودرز ایجاد کردند.

اوه و همکاران^۱ (۲۰۱۱) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی شهر پوهانگ^۲ کره را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام دادند. نتایج نشان داد دقت نقشهٔ به‌دست‌آمده بیش از ۷۷ درصد است؛ همچنین لایهٔ خاک بیشترین اثر و ارتفاع کمترین اثر را بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی آن منطقه دارد.

آگاروال و همکاران^۳ (۲۰۱۳) با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در منطقهٔ اوناٹوی^۴ کشور هندوستان، پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی را انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد حدود ۲۵ درصد از مساحت منطقه پتانسیل خیلی خوب و خوب از نظر آب زیرزمینی دارد.

دومینگوس و همکاران^۵ (۲۰۱۷) با استفاده از سنجش از دور، GIS و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، منابع آب زیرزمینی حوضهٔ کومورو^۶ واقع در تیمور شرقی را پتانسیل‌یابی کردند. براساس نتایج، دشت آبرفتی واقع در شمال غرب منطقه پتانسیل خیلی خوبی دارد.

1. Oh et al.

2. Pohang

3. Agarwal et al.

4. Onaoi

5. Domingos et al.

6. Comoro

داس^۱ (۲۰۱۷) با استفاده از RS و GIS، منابع آب زیرزمینی شمال غرب بنگال را پتانسیل‌یابی کرد. وی محدوده‌های تشکیل‌شده از سنگ آهک را برای پتانسیل آب زیرزمینی بسیار مناسب تشخیص داد. در استان کرمان و به‌طور خاص در شهرستان‌های شمالی و شمال غربی آن به دلیل افزایش و گسترش روزافزون باغ‌های پسته، برداشت از منابع آب زیرزمینی این مناطق افزایش بیش از اندازه داشته است و کمبود آب، یکی از معضلات مهم در منطقه به شمار می‌آید. شهرستان سیرجان نیز، یکی از این مناطق است که به شناسایی منابع آب زیرزمینی جدید نیاز دارد؛ از این رو در این پژوهش سعی شده با استفاده از پردازش تصاویر راداری سنتینل ۱، چندطیفی سنتینل ۲ و روش Fuzzy-AHP که یکی از تکنیک‌های آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره است، در محیط GIS نقشه عوامل مختلف مؤثر بر ایجاد سفره‌های آب زیرزمینی تهیه، وزن‌دهی و تلفیق شود تا مناطق مناسب و دارای پتانسیل خوب (به‌لحاظ ذخیره آب زیرزمینی) شناسایی شوند. نوآوری این پژوهش در استفاده از تصاویر راداری و جدید سنتینل ۱ و سنتینل ۲ و همچنین استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی است که نسبت به روش‌های پیشین دقیق‌تر عمل می‌کند.

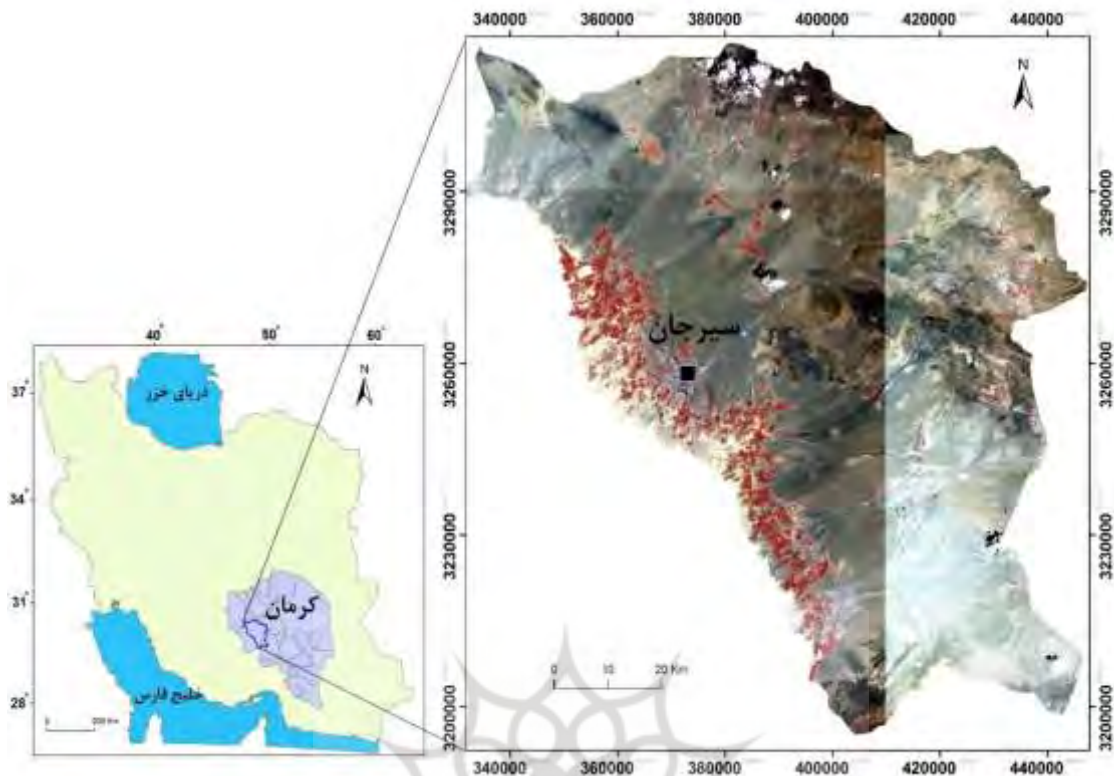
روش‌شناسی پژوهش

محدوده پژوهش

حوضه آبریز سیرجان در غرب استان کرمان و در مختصات جغرافیایی ۵۷° و ۵۴° تا ۲۶' و ۵۶° و ۵۷' طول شرقی و ۲۸° تا ۲۸' و ۲۹° عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه از سمت غرب به کفه نمکی سیرجان و از سمت شمال شرق به کمر بند آتشفشانی ایران مرکزی منتهی می‌شود. مساحت حوضه بیش از ۷۷۲۸ کیلومتر مربع است. حدود ۲۵ درصد از محدوده پژوهش را مناطق کوهستانی، ۱۵ درصد را کوهپایه‌ای و ۶۰ درصد آن را دشت تشکیل می‌دهد. پوشش غالب گیاهی موجود در دشت سیرجان را باغ‌های پسته تشکیل داده است. رسوبات قسمت‌های شمالی دشت درشت‌دانه است و تخلخل مفید و قابلیت نفوذپذیری زیاد دارد و به سمت نواحی غربی و جنوبی با فاصله گرفتن از محورهای رسوب‌گذاری، به تدریج قطر ذرات کمتر می‌شود و نفوذپذیری دشت کاهش می‌یابد. ضخامت سفره در قسمت شمال شرقی و جنوب دشت بیش از سایر مناطق است و به طرف ارتفاعات و حاشیه غربی به حداقل می‌رسد (عباس‌نژاد و شاه‌ی دشت، ۱۳۹۲: ۸۵).

از آنجا که اقتصاد این منطقه بر مبنای فعالیت در بخش کشاورزی است، حدود ۹۸ درصد حجم آب برداشت‌شده از سفره آب زیرزمینی صرف فعالیت‌های کشاورزی به‌ویژه باغ‌های پسته می‌شود (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۹۸).

^۱. Das



شکل ۱. موقعیت محدوده پژوهش (نگارندگان، ۱۳۹۹)

داده‌های استفاده‌شده

در این پژوهش، ترکیبی از مجموعه داده‌های ماهواره‌ای راداری و چندطیفی و نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی برای دستیابی به اهداف مدنظر به کار رفته است. در این زمینه از دو سری تصویر ماهواره‌ای شامل یک سین تصویر راداری مربوط به سنجنده Sentinel 1، ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV مربوط به تاریخ ۱۳ جولای ۲۰۱۹ و یک سین تصویر چندطیفی مربوط به سنجنده Sentinel 2 مربوط به تاریخ ۲۱ جولای ۲۰۱۹ استفاده شد. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SNAP 6 و ENVI انجام شد؛ همچنین مدل ارتفاع رقومی استفاده‌شده در این پژوهش از نوع SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است. تشکیل منابع آب زیرزمینی به عوامل هیدرولوژی و هیدروژئولوژی مختلفی بستگی دارد؛ در این پژوهش از شش عامل تأثیرگذار شامل سنگ‌شناسی، خطواره‌های تکتونیکی، شیب زمین، تراکم آبراهه‌ای، میزان بارندگی و پوشش گیاهی استفاده شد. در ادامه به ماهیت و نحوه تهیه هر لایه اشاره می‌شود.

سنگ‌شناسی

نوع سنگ و خصوصیات وابسته به آن نظیر تخلخل و بافت، نقش مهمی در نفوذپذیری اولیه و میزان جریان آب زیرزمینی در داخل سنگ‌ها ایفا می‌کند (Baharvand et al., 2016: 121). در این پژوهش، نقشه سنگ‌شناسی منطقه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سیرجان تهیه شد.

خطواره‌های تکتونیکی

خطواره‌های تکتونیکی (گسل‌ها و شکستگی‌های سطح زمین) به دلیل ایجاد فضای مناسب برای عبور آب و حرکت آن به سمت نقاط پایین‌تر در درون زمین، از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار بر تشکیل منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شوند (Andualem and Demeke, 2019: 100610). در این پژوهش به‌منظور تهیه لایه خطواره‌های تکتونیکی از روش آنالیز بافت تصاویر راداری سنتینل ۱ و اعمال فیلتر جهت‌دار روی تصاویر استفاده شد که نحوه کار و توضیح روش یادشده در بخش‌های بعدی آمده است. نقشه تراکم خطواره‌ای با استفاده از ابزار Line Density در محیط ArcGIS تهیه شد. قدرت تفکیک پیکسلی این نقشه، ۱۰ متر است.

شیب

شیب زمین نقش بسیار مهمی در نفوذپذیری، تشکیل خاک و کنترل عواملی نظیر سیل خیزی دارد؛ در نتیجه در پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. مناطق با شیب کم، آب را برای مدت‌زمان بیشتری حفظ می‌کنند که این امر باعث نفوذ بیشتر آب و تغذیه آبخوان می‌شود (Andualem and Demeke, 2019: 100610). به‌منظور تهیه نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی SRTM ۳۰متری استفاده شد.

تراکم آبراه‌های

مشخصات ژئوهیدرولوژی هر آبخوان، یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در پتانسیل‌یابی و اکتشافات منابع آب است؛ در این بین آبراه‌ها، یکی از مهم‌ترین منابع تغذیه‌کننده آب زیرزمینی محسوب می‌شوند. تراکم آبراه‌های با نفوذپذیری یک آبخوان ارتباط معکوس دارد؛ هرچه تراکم بیشتر باشد، رواناب بیشتر می‌شود (رحیمی و سلیمانی، ۱۳۹۵: ۳۰). به‌منظور تهیه نقشه تراکم آبراهه، شبکه آبراهه‌ها از روی نقشه توپوگرافی ۲۵۰۰۰ مشخص و در محیط نرم‌افزار ArcGIS رقومی شد. نقشه تراکم آبراه‌های با استفاده از ابزار Point Density در محیط ArcGIS تهیه شد. قدرت تفکیک پیکسلی این نقشه، ۳۰ متر است.

بارندگی

منبع اولیه تأمین‌کننده آب زیرزمینی در هر منطقه، بارندگی است. ارتباط بارندگی با ایجاد آب زیرزمینی با عواملی چون توپوگرافی، لیتولوژی، پوشش گیاهی و... کنترل می‌شود. این عوامل بر میزان آب نفوذکننده به درون زمین مؤثرند (رحیمی و سلیمانی، ۱۳۹۵: ۳۰). به‌منظور تهیه نقشه هم‌باران از داده‌های بارندگی مربوط به پلت‌فرم جیوانی استفاده شد که از سایت ناسا^۱ تهیه شده است. این پلت‌فرم، یک نقشه میانگین بارندگی برای نقاط مختلف جهان در طول سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ تولید کرده است. قدرت تفکیک پیکسلی نقشه میانگین بارندگی، ۲۵۰ متر است.

^۱ <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>

پوشش گیاهی

پوشش گیاهی یک منطقه با توجه به آثاری که بر پدیده نفوذ، فرسایش، تبخیر و تعرق دارد، در ایجاد آب‌های زیرزمینی بسیار مؤثر است. با توجه به اینکه در مناطق نیمه‌خشک و خشک به‌ویژه در فصول خشک سال، آب سطحی بسیار محدود است، وجود پوشش گیاهی نمایانگر خوبی از آب زیرزمینی کم‌عمق است (یوسفی سنگانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۴). نقشه پوشش گیاهی منطقه پژوهش با استفاده از اعمال شاخص پوشش گیاهی (NDVI)^۱ روی تصاویر چندطیفی سنتینل ۲ استخراج شد. قدرت تفکیک پیکسلی نقشه پوشش گیاهی، ۱۰ متر است.

پردازش تصاویر راداری و چندطیفی

از آنجا که یکی از مهم‌ترین عوامل تمرکز و ایجاد منابع آب زیرزمینی، تکتونیک و به‌طور کلی خطواره‌های تکتونیکی است، به‌منظور تهیه نقشه مدنظر از پردازش تصاویر راداری سنتینل ۱ استفاده شد؛ به‌طوری که با انجام اعمال فیلترهای جهت‌دار روی تصویر، خطواره‌های تکتونیکی منطقه بارزسازی و ترسیم شد؛ علاوه بر این به‌منظور تهیه نقشه پوشش گیاهی از اعمال شاخص NDVI روی تصویر چندطیفی سنتینل ۲ استفاده شد که در ادامه روش‌های یادشده شرح داده می‌شوند.

آنالیز بافت^۲

آنالیز بافت، نوعی کمی‌سازی گام‌های خاکستری تصاویر براساس میزان زبری و نحوه توزیع آن است. این تکنیک تجزیه و تحلیل زمینه‌ای موجب برجسته‌سازی مناطق متفاوت یا همگن موجود در یک تصویر می‌شود. چندین روش برای آنالیز بافت وجود دارد؛ شامل روش ساختاری، آماری، روش مبتنی بر مطالعه فرم‌ها و روش فرکتال (Jain and Tuceryan, 1992: 220). در این پژوهش از روش آماری ماتریس هم‌رویداد گام‌های خاکستری^۳ هارلیک^۴ (۱۹۷۹) استفاده شد. این روش امکان شناسایی و انتخاب پارامترهایی را فراهم می‌کند که بهترین نقش را در اندازه‌گیری توزیع تن خاکستری ایفا می‌کنند. تاکنون از این روش در مطالعات مختلف زمین‌شناسی استفاده شده است (Sukumar and Selva, 2015: 2348; Celik, 2019: 2630). اجرای روش GLCM در محیط نرم‌افزار ENVI انجام شد. در نتیجه انجام این روش روی تصاویر ماهواره‌ای، ۸ فاکتور هم‌رویداد مختلف به‌صورت تصاویر مختلف ایجاد می‌شود که شامل فاکتور میانگین، واریانس، یکنواختی، تباین، اختلاف، آنتروپی، موقعیت ثانویه و همبستگی است. این فاکتورها کاربردهای زیادی در مطالعات زمین‌شناسی و توپوگرافی دارد. در این پژوهش از این فاکتورها در آنالیز مؤلفه‌های اصلی و سپس در عملیات فیلترینگ برای استخراج خطواره‌های تکتونیکی استفاده شد. خطواره‌های تکتونیکی علاوه بر ایجاد انفصال در سطوح باعث ایجاد مرز بین واحدهای سنگی مختلف و پستی و

^۱ Normalized difference vegetation index

^۲ Textural Analysis

^۳ Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM)

^۴ Haralick

بلندی‌های ژئومورفیک می‌شوند؛ بنابراین روی تصاویر ماهواره‌ای با تغییر تن و کنتراست مشخص می‌شوند. از بین الگوریتم‌های شناسایی خطواره موجود در سنجش از دور، آنهایی که براساس تکنیک فیلترگذاری جهت‌دار عمل می‌کنند، نتایج بهتری به دست داده‌اند (Khosroshahzadeh et al., 2016: 232; Masoumi et al., 2017: 2286; Chaudhry et al., 2019: 117). مبنای روش فیلترینگ براساس شناسایی پیکسل‌های مجاور است که به‌طور ناگهانی تغییری در گام‌های خاکستری آنها رخ داده است.

شاخص NDVI

شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، یک شاخص ساده گرافیکی است که با استفاده از اندازه‌گیری‌های سنجش از دور، بر تغییر پوشش گیاهی نظارت می‌کند (Chang et al., 2018: 1). در این شاخص، مقادیر نرمال در دامنه بین ۱- و ۱+ قرار دارند. ارزش این شاخص فاقد واحد است و در تفسیر ارزش‌های این شاخص صفر به‌صورت تقریبی نشان‌دهنده نبود پوشش گیاهی، مقادیر منفی نشان‌دهنده سطوح بدون پوشش و مقادیر بزرگ‌تر از صفر نشان‌دهنده حضور پوشش گیاهی است؛ بدین صورت که هرچه ارزش مزبور بیشتر باشد، تراکم پوشش نیز بیشتر خواهد بود. این شاخص از تقسیم اختلاف مقادیر باندهای قرمز (RED) و مادون قرمز نزدیک (NIR) بر مجموع آنها به دست می‌آید.

تکنیک آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

یکی از روش‌های تصمیم‌گیری در موضوعات مختلف، بررسی معیارهای مختلف درگیر و مؤثر در آن موضوع است. بدین منظور روشی به نام تکنیک آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره طراحی و استفاده شده است. این روش خود شامل زیرمجموعه‌ای از روش‌های مختلف است؛ مانند روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)، روش فازی و تلفیق روش‌های مختلف؛ در این پژوهش از تلفیق روش تحلیل سلسله‌مراتبی و فازی برای بررسی معیارهای مختلف مؤثر در امر پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده شده است. چالش بزرگ و اصلی این روش، انتخاب معیارهای واقعی، دقیق و تأثیرگذار در امر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی است. نحوه انتخاب معیارها به دانش کافی در زمینه هیدرولوژی نیاز دارد؛ علاوه بر این یکی از مهم‌ترین مراحل فرایند تصمیم‌گیری، تعیین وزن معیارهاست؛ به‌طوری که وزن‌هایی که به معیارها داده می‌شود، مستقیماً تأثیر خود را بر نتیجه تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد. دقت تجزیه و تحلیل به تعیین وزن با دقت مناسب بستگی دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین وزن معیارها وجود دارد و از آنجا که این روش‌ها به‌لحاظ میزان دقت، آسانی استفاده و ساختار نظری از یکدیگر متفاوت هستند، انتخاب روش وزن‌دهی به اولویت تصمیم‌گیران بستگی دارد.

روش Fuzzy-AHP

روش Fuzzy-AHP را نخستین بار چانگ^۱ (۱۹۹۶) ارائه کرد. تفاوت اساسی این روش با روش AHP، تفاوت در

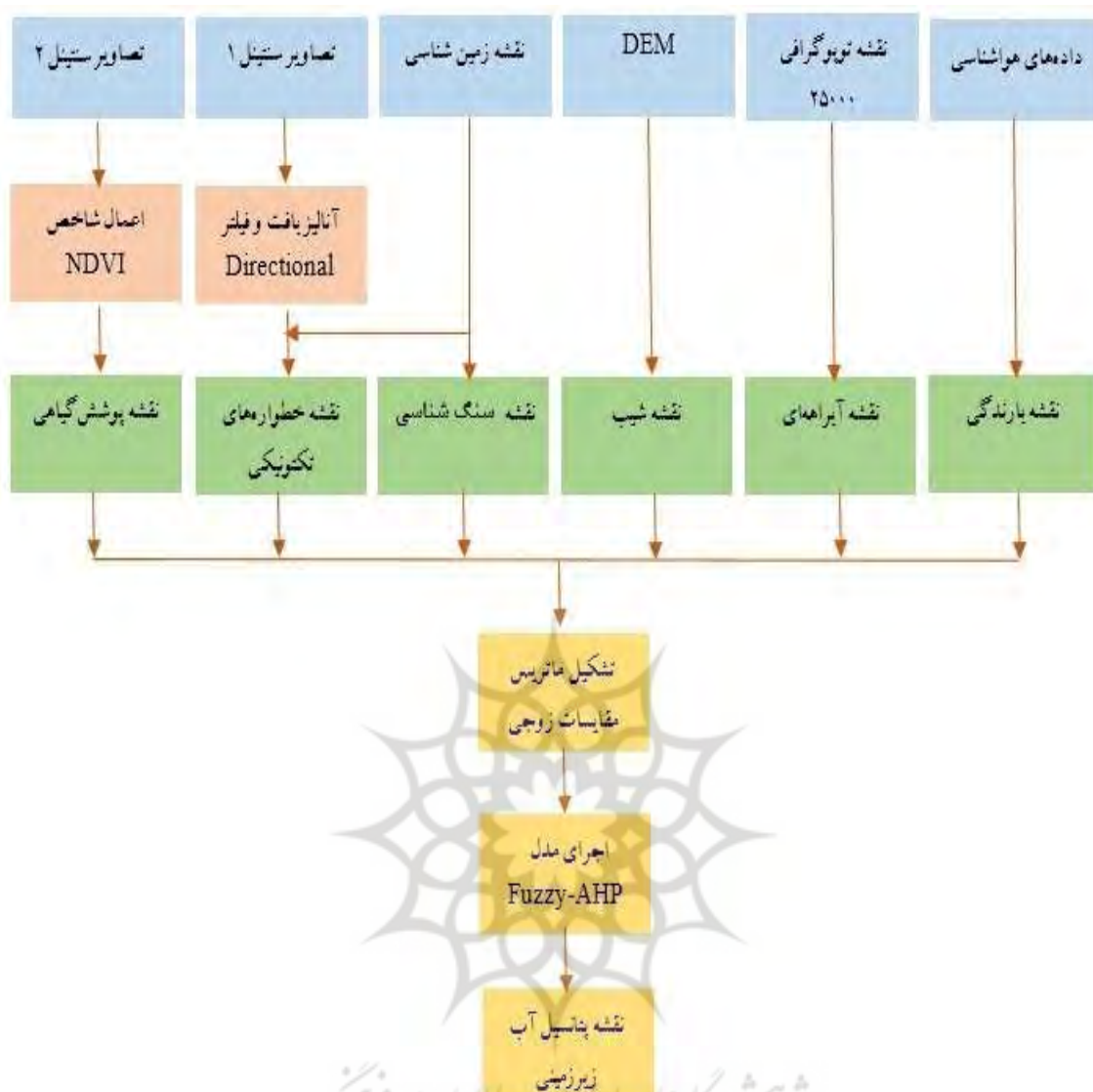
^۱. Chang

نحوه وزن‌دهی معیارها و گزینه‌هاست؛ به طوری که در این روش وزن‌دهی به صورت فازی انجام و ماتریس مقایسات دودویی به صورت فازی بیان می‌شود. جدول ۱ مقیاس‌های فازی استفاده‌شده در روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی را نشان می‌دهد؛ بنابراین در روش Fuzzy-AHP، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی با استفاده از مفاهیم اساسی نظریه مجموعه‌های فازی و به ویژه اعداد فازی به فضای فازی توسعه داده می‌شود (Rajasekhar et al., 2019: 100). مراحل انجام این روش به منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز سیرجان به شرح زیر است:

جدول ۱. طریقه وزن‌دهی معیارها در روش Fuzzy-AHP (Tseng et al., 2008: 37)

مقیاس زبانی برای وزن‌دهی	اعداد فازی	معکوس اعداد فازی
عیناً یکسان	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
اهمیت برابر یا عدم ترجیح	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	$(\frac{3}{2}, 1, \frac{1}{2})$
نسبتاً مهم‌تر	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{2}{3}, 1, \frac{1}{2})$
مهم‌تر	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{2}{5}, \frac{2}{3}, \frac{1}{2})$
خیلی مهم‌تر	$(2, \frac{5}{2}, 3)$	$(\frac{2}{3}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2})$
کاملاً مهم‌تر	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$	$(\frac{2}{7}, \frac{2}{3}, \frac{1}{5})$

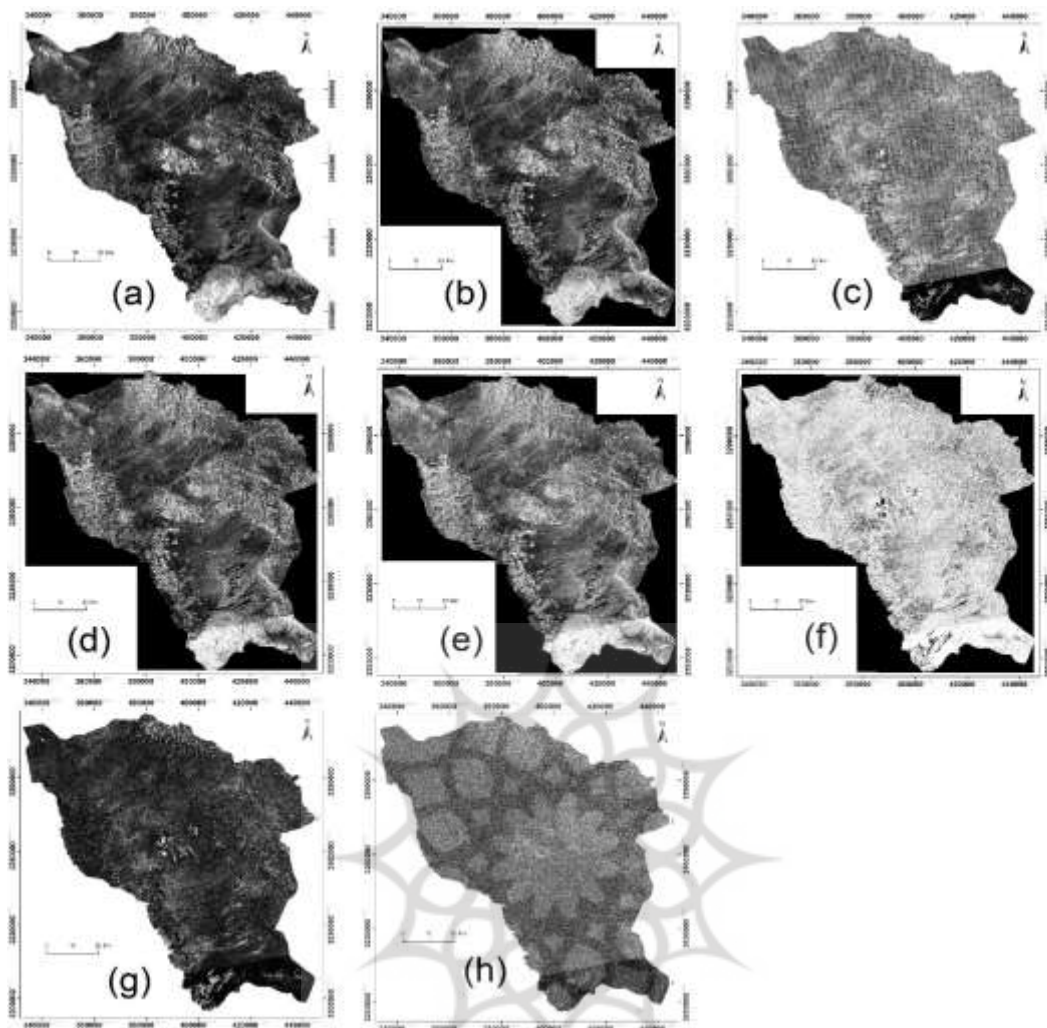
۱. ساخت پایگاه داده‌های فضایی و ایجاد و سازماندهی داده‌های فضایی مربوط به پتانسیل‌یابی و ساماندهی آنها در قالب مدل‌های برداری و رستری.
۲. مرحله پردازش داده‌ها که شامل استخراج نقشه‌های مشتق‌شده از لایه‌های مختلف است.
۳. تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با به کارگیری اعداد فازی: ماتریس مقایسه زوجی با کمک نظرات تصمیم‌گیرندگان درباره اهمیت عوامل نسبت به یکدیگر به صورت زوجی تشکیل می‌شود. درایه‌های این ماتریس، اعداد فازی مثلثی هستند که مؤلفه اول آن میزان حداقل نظرات، مؤلفه دوم میانگین نظرسنجی‌ها و مؤلفه سوم میزان حداکثر نظرسنجی‌هاست. در این زمینه از ۲۰ متخصص نظرسنجی شد. براساس نظرات کارشناسی، معیارها دوجه دو مقایسه و براساس اعداد فازی جدول ۱، وزن نهایی هر معیار محاسبه می‌شود.
۴. محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی و محاسبه بردار وزن نهایی. تعیین درجه عضویت فازی براساس توابع عضویت و تهیه نقشه فازی هریک از عوامل، یکی از اساسی‌ترین مباحث در نظریه فازی بحث تابع عضویت و چگونگی تعریف آن است. اساس اختلاف این روش با روش‌های دیگر، در تعریف تابع عضویت است. تابع عضویت نشان‌دهنده درجه تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیرمجموعه‌های آن است. در این پژوهش با استفاده از توابع عضویت خطی، نقشه‌های هریک از عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی به نقشه‌های فازی تبدیل شده‌اند.



شکل ۲. فلوجارت روش پژوهش (نگارندگان، ۱۳۹۹)

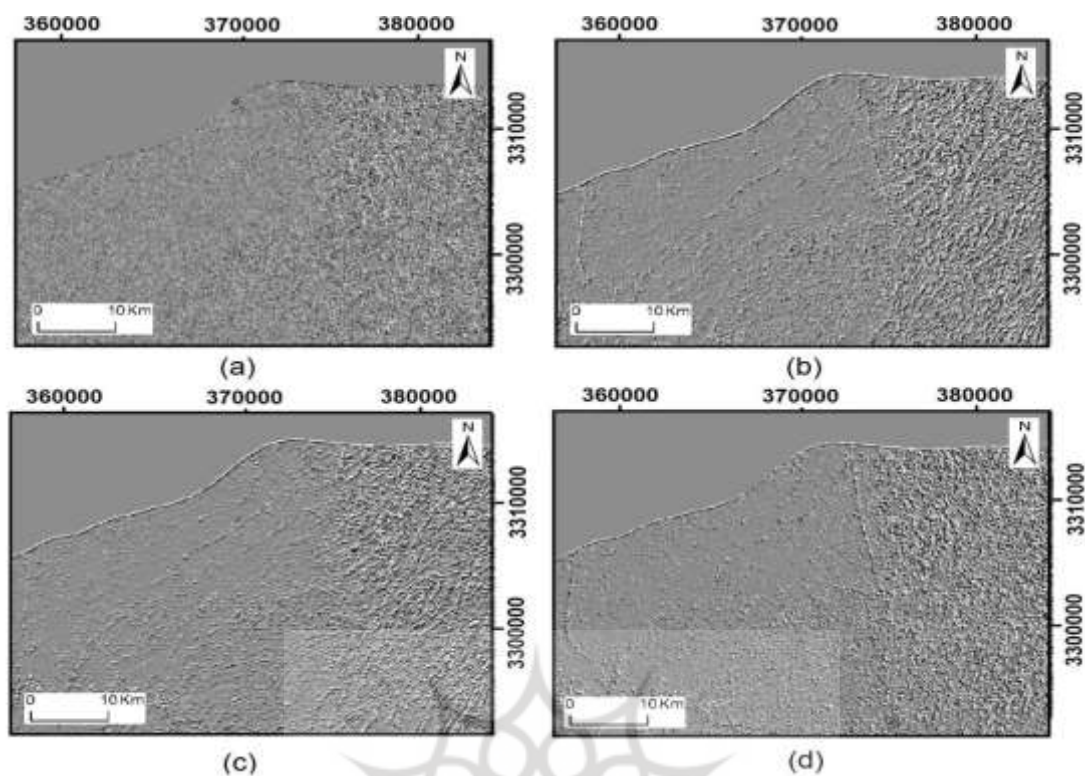
یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل آنها

آنالیز بافت روی تصویر راداری سنتینل ۱ مربوط به منطقه پژوهش انجام و در نتیجه آن، ۸ تصویر مربوط به فاکتورهای هم‌رویداد مختلف تهیه شد. در شکل ۳ تصاویر مربوط به فاکتورهای میانگین، واریانس، یکنواختی، تباین، اختلاف، آنتروپی، موقعیت ثانویه و همبستگی دیده می‌شود. به منظور استخراج خطواره‌های تکتونیکی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی روی ۸ فاکتور هم‌رویداد انجام شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی بدین منظور انجام می‌شود تا ضمن کاهش همبستگی باندهای مختلف، تفسیر ساختاری داده‌ها بهتر انجام شود. از آنجا که مؤلفه اصلی اول حدود ۹۰ درصد اطلاعات تصویر را در خود دارد، در نتیجه ویژگی‌های عمده ساختاری تصویر را خیلی بهتر نشان می‌دهد. به منظور کاهش نویز و افزایش هرچه بیشتر اطلاعات ساختاری، مؤلفه اصلی اول در خودش ضرب می‌شود.

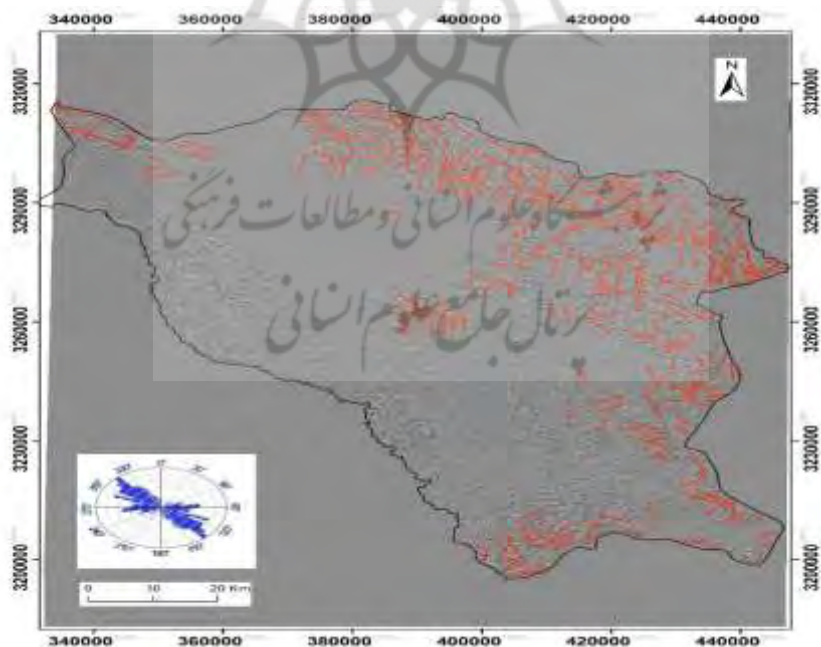


شکل ۳. فاکتورهای هم‌رویداد: a: میانگین، b: واریانس، c: یکنواختی، d: تباین، e: اختلاف، f: آنتروپی، g: موقعیت ثانویه و h: همبستگی (نگارندگان، ۱۳۹۹).

به منظور استخراج خطوط‌های تکتونیکی، روی تصویر مزدوج مؤلفه اصلی اول، فیلتر جهت‌دار در زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه اعمال شد تا از این راه به ترتیب خطوط‌های با راستای شمالی-جنوبی، شمال شرقی-جنوب غربی، شرقی-غربی و جنوب شرقی-شمال غربی بارزسازی شوند (شکل ۴). در نهایت خطوط‌های تکتونیکی در محیط GIS از روی تصاویر فیلترگذاری شده استخراج شد. البته بسیاری از عوارض خطی ایجاد شده به دست انسان مانند جاده‌ها و ساختمان‌ها نیز در این روش بارزسازی می‌شوند که باید از عوارض خطی طبیعی تفکیک و جدا شوند. از روی تصاویر فیلترگذاری شده تعداد ۳۸۹ خطواره تکتونیکی شناسایی شد (شکل ۵). رزدیگرام تصویر شده در شکل ۵ نشان‌دهنده وجود تقریباً دو جهت غالب شمال غربی-جنوب شرقی و شرقی-غربی در امتداد خطوط‌های تکتونیکی منطقه است که این روند استخراجی ناشی از جهت غالب نیروهای تکتونیکی عمل‌کننده در منطقه (Azadikhah et al., 2015: 821) است و با آن همخوانی دارد.

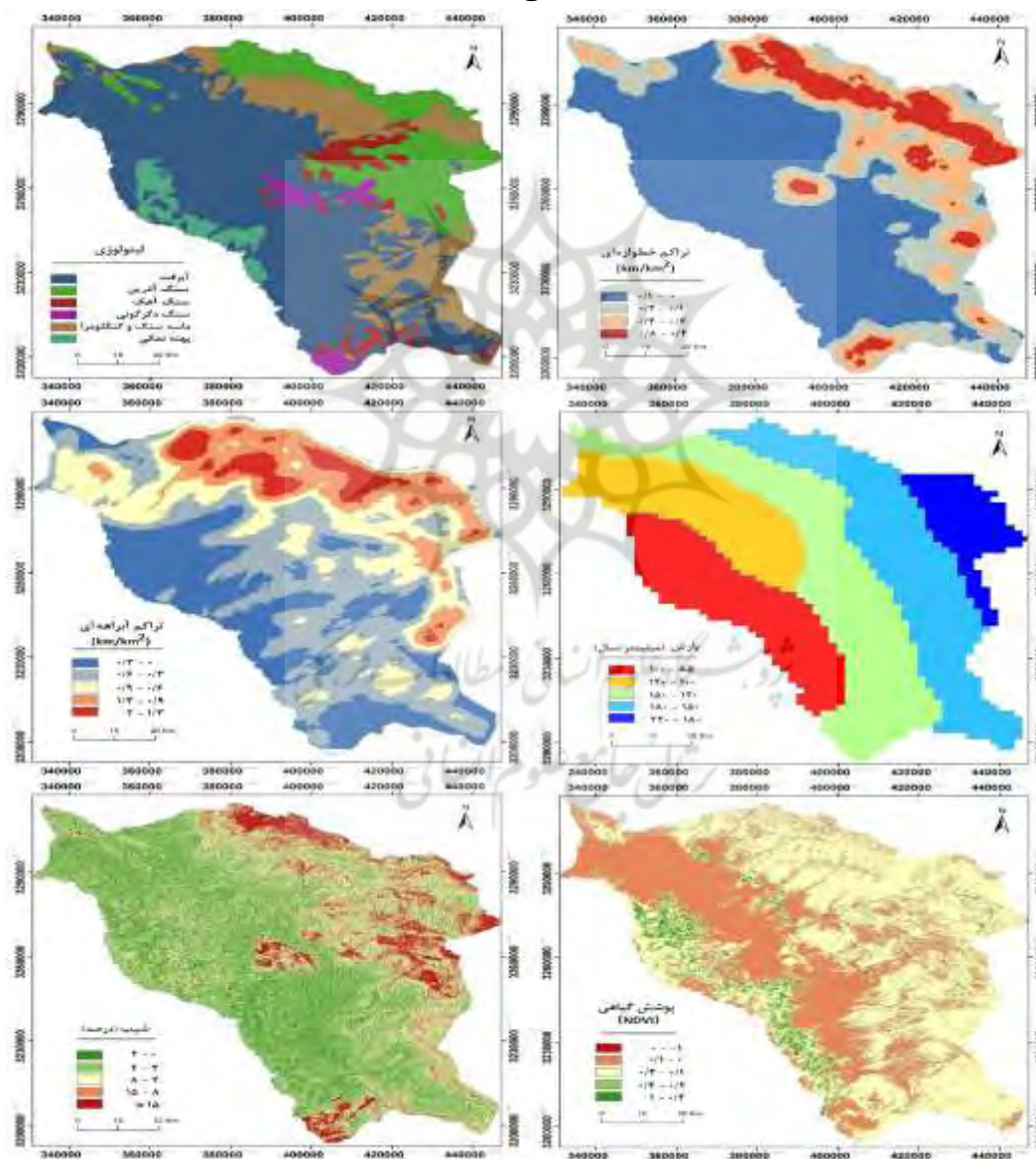


شکل ۴. نمونه تصاویر حاصل از اعمال فیلترهای جهت‌دار با زوایای a: صفر درجه، b: ۴۵ درجه، c: ۹۰ درجه، d: ۱۳۵ درجه (نگارندگان، ۱۳۹۹)



شکل ۵. نقشه خطواره‌های تکتونیکی منطقه پژوهش؛ تهیه‌شده در نتیجه آنالیز بافت و فیلترگذاری داده‌های راداری ستینیل ۱ (نگارندگان، ۱۳۹۹)

با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی این پژوهش پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی است، عوامل و معیارهای مؤثر بر تمرکز منابع آب زیرزمینی بررسی و در نهایت به صورت نقشه در محیط GIS ترسیم شد. همان‌طور که در بخش روش کار نیز بیان شد، در این زمینه از روش Fuzzy-AHP استفاده شد. نقشه شش معیار مؤثر بر پتانسیل‌یابی در شکل ۶ دیده می‌شود. به منظور دستیابی به نقشه نهایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در روش سلسله‌مراتبی فازی می‌باید نخست تک‌تک معیارها وزن‌دهی و براساس آن تلفیق انجام شود. ملاک مقایسه دودویی و وزن‌دهی، نظرات کارشناسی است. جدول ۲، ماتریس مقایسه دودویی معیارها را نشان می‌دهد. در این جدول ضمن تحلیل و مقایسه دودویی معیارها براساس اعداد فازی جدول ۱، وزن نهایی هر معیار نیز محاسبه شده است. بر این اساس معیار سنگ‌شناسی با وزن $0/378$ ، بیشترین تأثیر و معیار پوشش گیاهی با وزن $0/043$ ، کمترین تأثیر را بر تمرکز منابع آب زیرزمینی دارد.



شکل ۶. نقشه معیارهای مختلف تأثیرگذار بر تمرکز منابع آب زیرزمینی؛ a: نقشه سنگ‌شناسی، b: نقشه شیب، c: نقشه بارش، d: نقشه تراکم خطواره‌های تکتونیکی، e: نقشه تراکم آبراهه‌ای، d: نقشه پوشش گیاهی (نگارندگان، ۱۳۹۹)

جدول ۲. ماتریس مقایسه دودویی معیارها (نگارندگان، ۱۳۹۹)

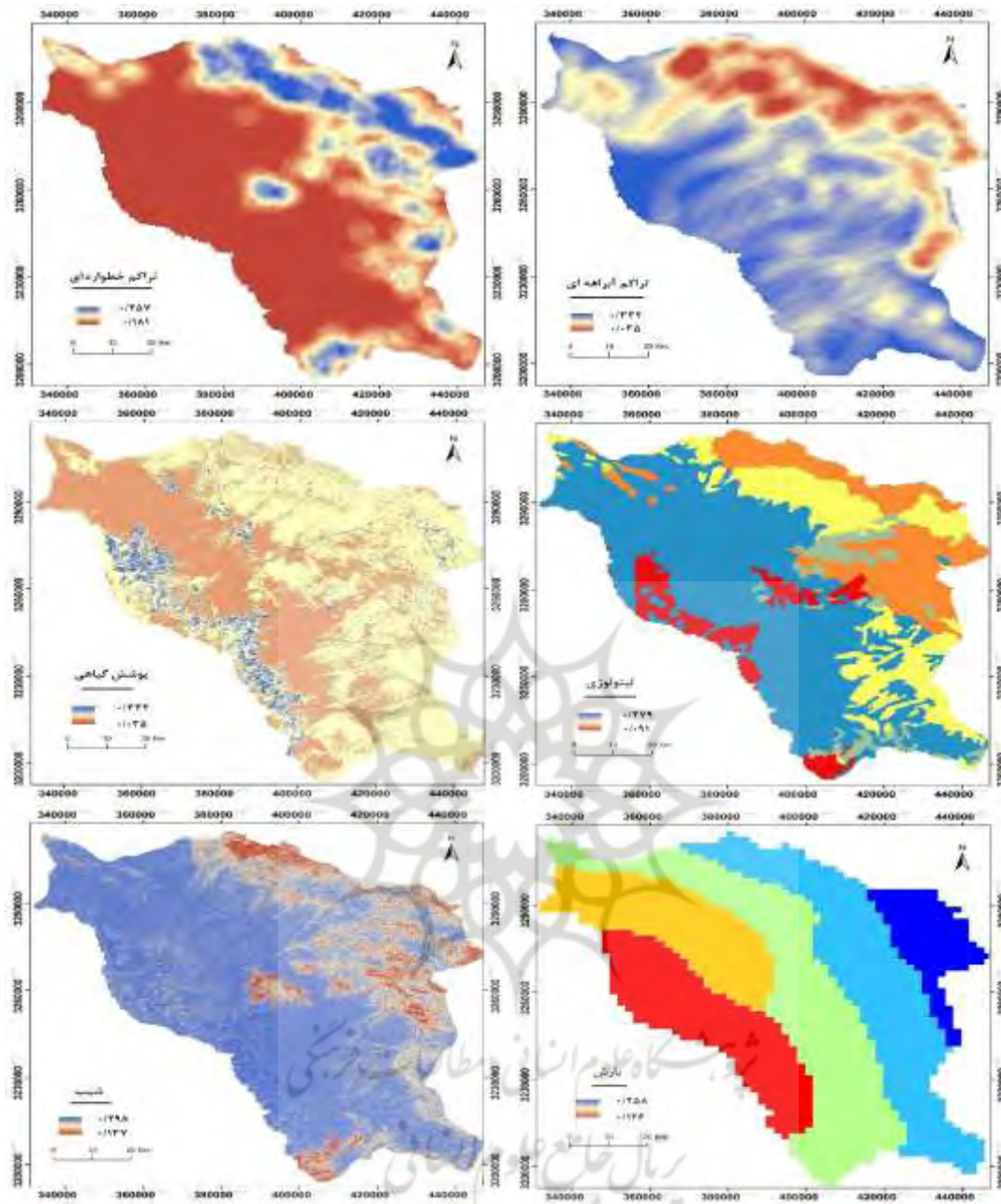
فاکتور	پوشش گیاهی	تراکم آبراهه‌ای	تراکم خطواره‌ای	بارندگی	شیب	سنگ‌شناسی	وزن نهایی
پوشش گیاهی	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	(2, $\frac{5}{2}$, 3)	($\frac{5}{2}$, 3, $\frac{7}{2}$)	($\frac{5}{2}$, 3, $\frac{7}{2}$)	0.043
تراکم آبراهه‌ای	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	(2, $\frac{5}{2}$, 3)	($\frac{5}{2}$, 3, $\frac{7}{2}$)	0.092
تراکم خطواره‌ای	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	(2, $\frac{5}{2}$, 3)	0.066
بارندگی	($\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$)	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	0.150
شیب	($\frac{2}{7}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$)	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	0.271
سنگ‌شناسی	($\frac{2}{7}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$)	($\frac{2}{7}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$)	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	0.378

از آنجا که هریک از معیارهای نام‌برده در درون خود زیرمعیارهایی با میزان تأثیر متفاوت بر تمرکز منابع آب زیرزمینی دارند، باید هریک از آنها نیز به صورت دودویی مقایسه و وزن‌دهی شوند. در این زمینه ماتریس مقایسه دودویی برای همه معیارها جداگانه تهیه شد (جدول‌های ۳ تا ۸). نقشه‌های فازی تهیه‌شده از هریک از معیارها در شکل ۷ دیده می‌شود.

از بین معیارهای مختلف، معیار سنگ‌شناسی، مهم‌ترین عامل محسوب می‌شود که در شکل ۶a ترسیم شده است. همان‌طور که در این نقشه دیده می‌شود، انواع سنگ‌شناسی‌های موجود در محدوده مدنظر ترسیم شده است. بررسی نظرات کارشناسی و مطالعات انجام‌شده (al., 2019: 120) نشان می‌دهد بهترین نوع سنگ‌شناسی به لحاظ تمرکز منابع آب، آبرفت است؛ پس از آن به ترتیب سنگ‌های رسوبی آهکی، ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومرا مهم هستند. سنگ‌های آذرین، دگرگونی و پهنه‌های نمکی در تمرکز و نفوذ آب‌های زیرزمینی نقش مهمی ندارند. بر این اساس نقشه سنگ‌شناسی منطقه به ۵ طبقه تقسیم می‌شود (شکل ۷a). در نتیجه در مرحله مقایسه دودویی و وزن‌دهی، بیشترین وزن به طبقه آبرفتی و سپس به طبقات دیگر تعلق می‌گیرد. در ماتریس مقایسه دودویی مربوط به معیار سنگ‌شناسی به زیرمعیار آبرفت، وزن $\frac{0.271}{0.378}$ و به زیرمعیار پهنه‌های نمکی، وزن $\frac{0.043}{0.378}$ تعلق می‌گیرد (جدول ۳).

جدول ۳. ماتریس مقایسه دودویی معیار سنگ‌شناسی (نگارندگان، ۱۳۹۹)

سنگ‌شناسی	پهنه نمکی	آذرین و دگرگونی	ماسه‌سنگ و کنگلومرا	سنگ آهک	آبرفت	وزن نهایی
پهنه نمکی	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	(2, $\frac{5}{2}$, 3)	($\frac{5}{2}$, 3, $\frac{7}{2}$)	0.091
آذرین و دگرگونی	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	(2, $\frac{5}{2}$, 3)	0.145
ماسه‌سنگ و کنگلومرا	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)	0.199
سنگ آهک	($\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$)	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	0.246
آبرفت	($\frac{2}{7}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$)	($\frac{1}{3}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$)	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	0.279



شکل ۷. نقشه‌های فازی شده معیارهای مختلف: a: نقشه سنگ‌شناسی، b: نقشه فازی شیب، c: نقشه فازی بارش، d: نقشه فازی تراکم خطواره‌های تکتونیکی، e: نقشه فازی تراکم آبراهه‌های، d: نقشه فازی پوشش گیاهی (نگارندگان، ۱۳۹۹)

فاکتور شیب زمین نیز، یکی از عوامل تأثیرگذار بر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود؛ به طوری که هرچه شیب سطح زمین کمتر باشد، نفوذ آب‌های سطحی به درون سفره‌های آب زیرزمینی بیشتر روی می‌دهد. همان‌طور که در نقشه ۷b می‌بینید، محدوده پژوهش از این لحاظ به پنج طبقه تقسیم شده است که طبقه صفر تا ۲ درصد، وزن ۰/۲۹۸ و شیب بیش از ۲۰ درصد، وزن ۰/۱۳۷ می‌گیرد (جدول ۴). دیگر فاکتورهای مؤثر بر تمرکز منابع آب زیرزمینی نیز به همین صورت طبقه‌بندی و وزن‌دهی شده‌اند که در جدول‌های ۵ تا ۸ دیده می‌شوند.

جدول ۴. ماتریس مقایسه دودویی معیار شیب (نگارندگان، ۱۳۹۹)

وزن نهایی	۰-۲	۲-۶	۶-۱۲	۱۲-۲۰	> ۲۰	شیب (درصد)
0.137	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	> ۲۰
0.169	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	۱۲-۲۰
0.178	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	۶-۱۲
0.219	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	۲-۶
0.298	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	۰-۲

جدول ۵. ماتریس مقایسه دودویی معیار بارش (نگارندگان، ۱۳۹۹)

وزن نهایی	۱۲۰-۱۵۰	۹۰-۱۲۰	۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۰-۳۰	بارندگی (میلی‌متر)
0.126	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	۰-۳۰
0.174	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	۳۰-۶۰
0.204	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	۶۰-۹۰
0.236	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	۹۰-۱۲۰
0.258	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	۱۲۰-۱۵۰

جدول ۶. ماتریس مقایسه دودویی معیار تراکم خطاره‌ای (نگارندگان، ۱۳۹۹)

وزن نهایی	۰/۳-۰/۴	۰/۲-۰/۳	۰/۱-۰/۲	۰-۰/۱	تراکم خطاره‌ای
0.181	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	۰-۰/۱
0.214	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	۰/۱-۰/۲
0.231	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	۰/۲-۰/۳
0.257	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	$(\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5})$	۰/۳-۰/۴

جدول ۷. ماتریس مقایسه دودویی معیار تراکم آبراهه‌ای (نگارندگان، ۱۳۹۹)

وزن نهایی	۱/۶-۲	۱/۲-۱/۶	۰/۸-۱/۲	۰/۴-۰/۸	۰-۰/۴	تراکم آبراهه‌ای
0.035	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$	$(2, \frac{5}{2}, 3)$	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	۱/۶-۲
0.105	$(2, \frac{5}{2}, 3)$	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	۱/۲-۱/۶
0.246	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	۰/۸-۱/۲
0.285	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	$(\frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2})$	۰/۴-۰/۸
0.332	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	$(\frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2})$	$(\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5})$	۰-۰/۴

جدول ۸. ماتریس مقایسه دودویی معیار پوشش گیاهی (نگارندگان، ۱۳۹۹)

وزن نهایی	۵	۴	۳	۲	۱	پوشش گیاهی
0.035	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$	$(2, \frac{5}{2}, 3)$	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	۱
0.105	$(2, \frac{5}{2}, 3)$	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	۲
0.246	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	۳
0.285	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	$(\frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2})$	۴
0.332	(1, 1, 1)	$(\frac{3}{2}, 1, 2)$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$	$(\frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2})$	$(\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5})$	۵

جدول ۹ وزن معیارها، زیرمعیارها و وزن نهایی هریک را نشان می‌دهد. در این جدول، وزن نهایی هریک از زیرمعیارها با ضرب وزن معیار اصلی در وزن زیرمعیار به دست آمده است. به منظور تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی، تمام نقشه‌های تهیه شده و وزن‌دهی شده به روش سلسله‌مراتبی فازی در محیط GIS با یکدیگر تلفیق و با استفاده از روش طبقه‌بندی کمی، نقشه یادشده طبقه‌بندی شد. شکل ۸، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، به لحاظ پتانسیل آب زیرزمینی، محدوده پژوهش به ۵ طبقه خیلی خوب، خوب، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم می‌شود. حدود ۳ درصد از محدوده پژوهش را طبقه خیلی خوب (۲۲۸ کیلومتر مربع)، ۱۱ درصد را خوب (۸۳۶ کیلومتر مربع)، ۵۲ درصد را متوسط (۴۰۱۶ کیلومتر مربع)، ۲۹ درصد را ضعیف (۲۲۵۲ کیلومتر مربع) و ۵ درصد را خیلی ضعیف (۳۹۶ کیلومتر مربع) تشکیل می‌دهد. محدوده‌های خیلی خوب و خوب بیشتر در بخش‌های کوهپایه‌ای منطقه واقع شده‌اند.

به منظور صحت‌سنجی نقشه پتانسیل تهیه شده، از اطلاعات و دبی چاهها و چشمه‌های موجود در محدوده پژوهش استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، وضعیت کنونی چاهها به این صورت است که ۱۳۰ چاه در طبقه خیلی کم، ۱۴۲ چاه در بخش با پتانسیل کم، ۶۷۰ چاه در طبقه متوسط، ۲۰۵ چاه در بخش با پتانسیل خوب و فقط ۴ حلقه چاه در بخش با پتانسیل خیلی خوب قرار دارد. برای صحت‌سنجی دبی و میزان شوری، تعداد ۳۰ حلقه چاه بررسی شد که به طور یکسان در تمام طبقات پراکنده‌اند.

به منظور حفظ همگنی و امکان انجام مقایسه بین داده‌های حاصل از چاههای مشاهده‌ای با طبقات نقشه پتانسیل آب زیرزمینی، میزان دبی و شوری چاهها با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی فواصل برابر در محیط GIS به ۵ دسته

خیلی کم (دبی بین ۱۵-۹ لیتر بر ثانیه و شوری بین ۱۰۰۰-۴۳۰ میکروموس بر سانتی‌متر)، کم (دبی بین ۲۱-۱۵ لیتر بر ثانیه و شوری بین ۱۰۰۰-۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر)، متوسط (دبی بین ۲۷-۲۱ لیتر بر ثانیه و شوری بین ۳۰۰۰-۵۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر)، زیاد (دبی بین ۳۳-۲۷ لیتر بر ثانیه و شوری بین ۸۰۰۰-۵۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) و خیلی زیاد (دبی بین ۳۹-۳۳ لیتر بر ثانیه و شوری بین ۱۱۰۰۰-۸۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) تقسیم‌بندی شد و روی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی قرار گرفت.

ماتریکس خطای به‌دست‌آمده از مقایسه کلاس‌های مربوط به دبی و شوری چاههای مشاهده‌ای با طبقات نقشه پتانسیل آب زیرزمینی، نشان از صحت $۸۳/۳۳$ و $۷۳/۳۳$ درصد به ترتیب برای داده‌های مربوط به دبی و شوری چاهها در ارتباط با طبقات پتانسیل آب زیرزمینی دارد (جدول‌های ۱۰ و ۱۱)؛ همچنین نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد محدوده‌های با پتانسیل بسیار خوب و خوب بیشتر بر آبرفت منطبق و پس از آن روی سنگ‌های آهکی واقع شده است.

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مشابه در دیگر مناطق، نشان از کارآمدی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در شناسایی منابع آب زیرزمینی دارد؛ همچنین مناطق با پتانسیل زیاد آب زیرزمینی در بیشتر این پژوهش‌ها مانند نتایج حاصل از این پژوهش بر مناطق آبرفتی و سنگ‌های آهکی منطبق هستند (Chaudhry et al., 2019: 102; Rajasekhar et al., 2019: 6)؛ برای نمونه سلیک^۱ (۲۰۱۹) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، حوضه رودخانه تیگریس^۲ ترکیه را به پنج منطقه پتانسیلی تقسیم می‌کند که منطقه با پتانسیل زیاد با مساحت ۱۳ درصد روی پهنه آبرفتی آن حوضه قرار می‌گیرد.

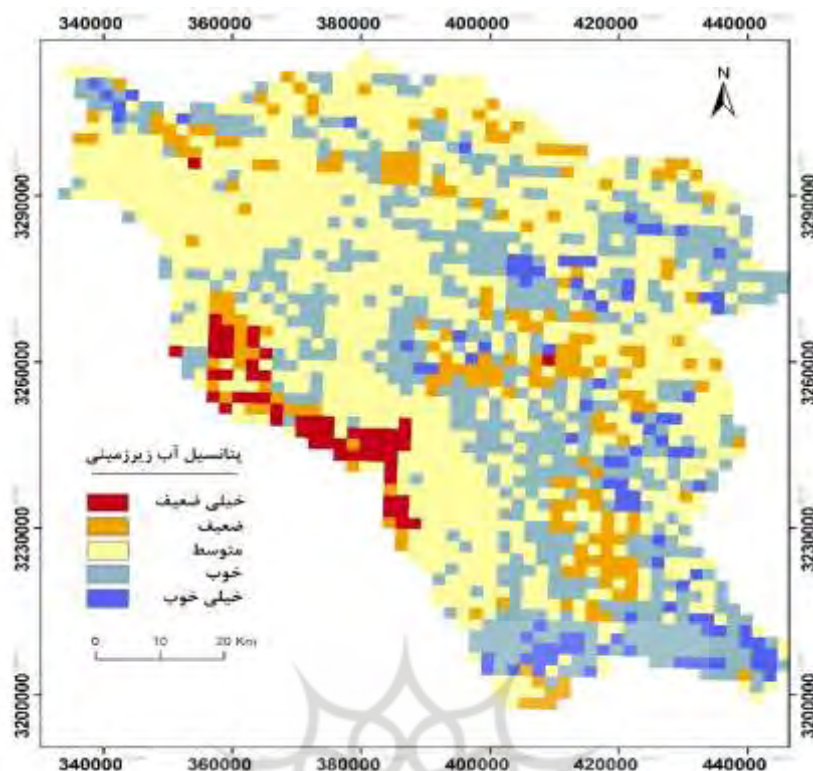
موضوع دیگری که در شکل ۹ دیده می‌شود، منطبق‌نبودن بیشتر چاههای موجود بر محل‌های با پتانسیل خوب و خیلی خوب در منطقه است. این موضوع دلایل مختلفی دارد؛ از جمله اینکه موقعیت‌یابی و انتخاب محل حفر چاه در گذشته غالباً به‌صورت غیرعلمی و صرفاً تجربی بوده است یا اینکه کشاورزان در محلی اقدام به حفر چاه می‌کرده‌اند که زمین‌های مسطح و مناسب برای ایجاد مزرعه داشته است و مطمئناً نزدیک‌ترین محل به زمین زراعی را بدین منظور انتخاب کرده‌اند تا مستلزم انتقال فاصله زیاد آب از چاه به محل مزرعه نباشند و مطمئناً انتخاب روش‌های علمی و نوین با درنظرگرفتن تمامی عوامل دخیل در این امر، نتایج بهتری دربر خواهد داشت.

^۱. Celik

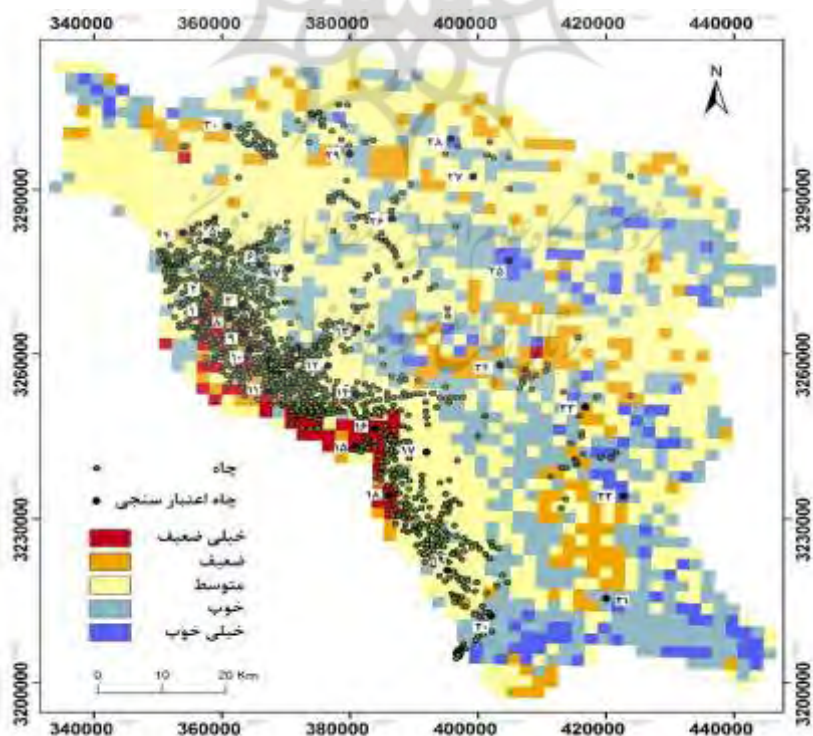
^۲. Tigris River

جدول ۹. وزن معیارها و زیرمعیارها و وزن نهایی (نگارندگان، ۱۳۹۹)

Fuzzy-AHP			زیرمعیار	معیار
وزن نهایی	وزن زیرمعیار	وزن معیار		
0.035	0.091	0.378	پهنه نمکی	سنگ‌شناسی
0.055	0.145		آذرین و دگرگونی	
0.075	0.199		ماسه‌سنگ و کنگلومرا	
0.093	0.246		سنگ آهک	
0.105	0.279		آبرفت	
0.037	0.137	0.271	> ۲۰	شیب
0.045	0.169		۱۲-۲۰	
0.048	0.178		۶-۱۲	
0.059	0.219		۲-۶	
0.080	0.298		۰-۲	
0.019	0.126	0.150	۰-۳۰	بارندگی
0.026	0.174		۳۰-۶۰	
0.030	0.204		۶۰-۹۰	
0.035	0.236		۹۰-۱۲۰	
0.039	0.258		۱۲۰-۱۵۰	
0.012	0.181	0.066	۰-۰/۱	تراکم خطواره‌ای
0.014	0.214		۰/۱-۰/۲	
0.015	0.231		۰/۲-۰/۳	
0.017	0.257		۰/۳-۰/۴	
0.003	0.035	0.092	۱/۶-۲	تراکم آبراهه‌ای
0.010	0.105		۱/۲-۱/۶	
0.023	0.246		۰/۸-۱/۲	
0.026	0.285		۰/۴-۰/۸	
0.031	0.332		۰-۰/۴	
0.002	0.035	0.043	۱	پوشش گیاهی
0.004	0.105		۲	
0.011	0.246		۳	
0.012	0.285		۴	
0.014	0.332		۵	



شکل ۸. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی (نگارندگان، ۱۳۹۹)



شکل ۹. موقعیت چاه‌های موجود روی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۹۸)

جدول ۱۰. اطلاعات چاههای استفاده شده در صحت‌سنجی (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۹۸)

شماره چاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
دبی (لیتر بر ثانیه)	۱۲	۱۱	۱۷	۱۹	۲۸	۳۵	۳۲	۱۵	۱۵	۲۰	۱۷	۲۵	۱۷	۳۱	۲۱
EC (میکروموس بر سانتی‌متر)	۹۳۰۰	۶۰۰۰	۲۸۰۰	۴۰۰۰	۱۷۷۰	۱۹۰۰	۶۹۰۰	۷۰۰۰	۱۱۰۰۰	۹۲۰۰	۵۷۰۰	۵۴۰۰	۳۲۰۰	۱۸۰۰	۷۸۰۰
شماره چاه	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
دبی (لیتر بر ثانیه)	۹	۲۶	۲۴	۳۳	۲۸	۳۷	۳۱	۲۰	۳۲	۳۱	۲۹	۳۱	۲۴	۳۱	۲۷
EC (میکروموس بر سانتی‌متر)	۷۴۰۰	۲۳۰۰	۵۶۰۰	۱۹۰۰	۶۵۰	۹۳۰	۸۷۰	۱۶۰۰	۹۰۰	۴۳۰	۱۱۰۰	۲۵۰۰	۵۸۰	۷۵۰	۱۳۰۰

جدول ۱۱. ماتریکس خطای حاصل از مقایسه طبقات دبی و شوری چاهها با طبقات پتانسیل آب زیرزمینی

		طبقات پتانسیل آب زیرزمینی					
		خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	مجموع
طبقات دبی چاهها	خیلی کم	*۲	۱	۰	۰	۰	۳
	کم	۰	*۷	۰	۱	۰	۸
	متوسط	۰	۱	*۵	۰	۰	۶
	زیاد	۰	۱	۰	*۸	۱	۱۰
	خیلی زیاد	۰	۰	۰	۰	*۳	۳
	مجموع	۲	۱۰	۵	۹	۴	۳۰
		طبقات پتانسیل آب زیرزمینی					
		خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	مجموع
طبقات شوری چاهها	خیلی کم	۰	۰	۰	۲	*۵	۷
	کم	۰	۰	۱	*۷	۱	۹
	متوسط	۰	۰	*۲	۱	۰	۳
	زیاد	۱	*۶	۰	۱	۰	۸
	خیلی زیاد	*۲	۱	۰	۰	۰	۳
	مجموع	۳	۷	۳	۱۱	۶	۳۰

* نشان‌دهنده انطباق طبقات دبی و شوری چاهها بر طبقات پتانسیل آب زیرزمینی

با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، چنین استدلال می‌شود که تکنیک آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره، نظیر Fuzzy-AHP، ابزاری انعطاف‌پذیر و پشتیبان برای شناسایی منابع آب زیرزمینی جدید است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از روش ماتریس هم‌رویداد گام‌های خاکستری نشان از قابلیت این روش در استخراج خطوط‌های تکتونیکی دارد؛ علاوه بر این بیشتر بودن قدرت تفکیک مکانی تصاویر راداری سنتینل ۱ نسبت به تصاویر نوری در دسترس باعث شده است تفکیک و شناسایی خطوط‌های تکتونیکی خیلی بهتر انجام شود؛ بنابراین می‌توان از این تصاویر در مطالعات مشابه استفاده کرد.

با تلفیق لایه‌های مؤثر بر تمرکز آب زیرزمینی، محدوده پژوهش به‌لحاظ وجود ذخایر آب زیرزمینی پتانسیل‌یابی شد. نتایج نشان می‌دهد حدود ۱۴ درصد از مساحت محدوده پتانسیل خوبی در این زمینه دارد که این مناطق نیز بیشتر در محدوده‌های کوهپایه‌ای و درون سنگ‌های آهکی و آبرفتی واقع شده‌اند. پژوهش‌های زیادی (Lee and Lee, 2015: 13416; Domingos et al., 2017: 503; Rajasekhar et al., 2019: 97; Andualem and Demeke, 2019: 100610) همانند این پژوهش، بر وجود منابع غنی آب زیرزمینی در آبرفت و سنگ‌های آهکی تأکید می‌کنند.

از آنجا که روش Fuzzy-AHP امکان تبدیل ارزش نقشه فاکتورهای مختلف را به طیف پیوسته‌ای بین ۰ و ۱ فراهم می‌کند، باعث می‌شود مرز بین طبقات به‌صورت تدریجی تعیین شود؛ در نتیجه نقش هر معیار به‌صورت احتمالی و نه قطعی تعیین می‌شود که این روش با سازوکار عوامل طبیعی مطابقت بیشتری دارد؛ همچنین نتایج حاصل از صحت‌سنجی روش Fuzzy-AHP، ضمن تأیید کاربرد این روش در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، مؤید کارایی روش یادشده به‌مثابه روشی نسبتاً دقیق در امر تصمیم‌گیری است. با توجه به کاهش کیفیت منابع آبی چاههای موجود، محدوده‌های شناسایی شده با پتانسیل خوب و خیلی خوب امکان مطالعات اکتشافی را برای تأمین منابع آبی جدید دارند.

منابع

- آبشیرینی، احسان، رنگزن، کاظم، خورشیدی، سعدی، (۱۳۸۷). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش هم‌پوشانی شاخص وزنی در محیط GIS؛ مطالعه موردی در محدوده تاقدیس پابده، همایش ژئوماتیک، تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱-۱۱.
- رحیمی، داریوش، موسوی، سید حجت، (۱۳۹۲). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل AHP و تکنیک GIS؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز شاهرود- بسطام، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۱۷، شماره ۴۴، ۱۳۹-۱۵۹.
- رحیمی، محمد، سلیمانی، کریم، (۱۳۹۵). ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دوره ۱۰، شماره ۳۵، ۲۷-۳۸.
- رضایی مقدم، محمدحسین، رحیم‌پور، توحید، نخستین‌روحي، مهسا، (۱۳۹۵). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی؛ مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز منتهی به دشت تبریز، نشریه اکوهیدرولوژی، دوره ۳، شماره ۳، ۳۷۹-۳۸۹.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، (۱۳۹۸). سیمای آب استان، معاونت مطالعات پایه منابع آب. صابری، عظیم، رنگزن، کاظم، مهجوری، رضا، کشاورزی، محمدرضا، (۱۳۹۱). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و GIS به روش تحلیل سلسله‌مراتبی در تاق‌دیس کمستان استان خوزستان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱، شماره ۶، ۱۱-۲۰.

صداقت، محمود، (۱۳۸۵). زمین و منابع آب (آب‌های زیرزمینی)، چاپ پنجم، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۳۷۶ صفحه.

عباس‌نژاد، احمد، شاهی‌دشت، علی، (۱۳۹۲). بررسی آسیب‌پذیری دشت سیرجان با توجه به برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی منطقه، جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای، دوره ۳، شماره ۷، ۸۵-۹۶.

قربانی‌نژاد، سمیرا، دانش‌فر، مانیا، رحمتی، امید، فلاح، فاطمه، حق‌زاده، علی، طهماسبی‌پور، ناصر، (۱۳۹۶). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی دشت ازنا- الیگودرز با استفاده از متغیرهای محیطی و مدل نسبت فراوانی، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۸، شماره ۲، ۶۲-۷۸.

مفیدی‌فر، مهدی، المدرسی، سید علی، اصلاح، مهدی، ملک‌زاده بافقی، شاهرخ، (۱۳۹۳). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط GIS؛ مطالعه موردی: حوضه دشت یزد اردکان، همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش از دور و GIS) در آمایش سرزمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد، ۱۱-۲۰.

یوسفی سنگانی، کیوان، محمدزاده، حسین، اکبری، مرتضی، (۱۳۹۱). پتانسیل یابی آب زیرزمینی کوه‌های هزار مسجد با استفاده از مدل تلفیقی فازی و AHP؛ مطالعه موردی: شمال شرقی کوه‌های هزار مسجد در استان خراسان رضوی، اولین همایش ملی بحران آب و پیامدهای ناشی از آن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فردوس، ۱-۷.

- Agarwal, E., Rajat, A., Garg, R.D., Garg P.K., (2013). **Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach**, Journal of Earth System Science, Volume 122, Issue 3, Pp 887- 898.
- Andualem, T.G., Demeke, G.G., (2019). **Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia**, Journal of Hydrology: Regional Studies 24 (2019), 100610, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610>.
- Azadikhah, A., Bouzari, S., Yassaghi, A., Emami, M.H., (2015). **Formation of Extensional Basin in Internal Part of the Zag-Ros Orogeny in West of Sirjan, Iran**, Open Journal of Geology, Volume 5, Pp 821- 827.
- Baharvand, S., Rahnamarad, J., Soori, S., (2016). **Delineation of groundwater recharge potential zones using weighted linear combination method (case study: Kuhdasht plain, Iran)**, Journal of Geotechnical Geology, Volume 12, Issue 2, Pp 119- 125.
- Celik, R., (2019). **Evaluation of Groundwater Potential by GIS-Based Multicriteria Decision Making as a Spatial Prediction Tool: Case Study in the Tigris River Batman-Hasankeyf Sub-Basin, Turkey**, Water 2019, Volume 11, 2630 p, <https://doi.org/10.3390/w11122630>.
- Cesar, S., Hedwige, C., Guimolaire, D., Ernestine, M., Etouna, J., Njandjock, P., Nyeck, B., (2018). **Radarsat-1 image processing for regional-scale geological mapping with mining vocation under dense vegetation and equatorial climate environment, Southwestern Cameroon**, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 21 (2018) Pp S43- S54, <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.05.005>.

- Chang, D.Y., (1996). **Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP**, Eur J Oper Res 95, Pp 649- 655.
- Chang, J., Tian, J., Zhang, Z., Chen, X., Chen, Y., Chen, S., Duan, Z., (2018). **Changes of Grassland Rain Use Efficiency and NDVI in Northwestern China from 1982 to 2013 and Its Response to Climate Change**, Water, 10 (11), 1689, 2018, Pp 1- 20.
- Chaudhry, A.K., Kumar, K., Alam, M.A., (2019). **Mapping of groundwater potential zones using the fuzzy analytic hierarchy process and geospatial technique**, Geocarto Internationa, Geocarto International, Volume 14, Issue 3, Pp 117- 127, <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1695959>.
- Das, S., (2017). **Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain in Gangajalghati block, Bankura district, India using remote sensing and GIS techniques**, Model, Earth Syst, Environ, Volume 23, Issue 4, Pp 45- 61, <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0396-7>.
- Domingos, P., Sangam, S., Mukand, B., Sarawut, N., (2017). **Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique**, Applied Water Science, Volume 7, Issue 1, Pp 503- 519.
- Haralick, R.M., (1979). **Statistical and structural approaches to texture**, Proc. IEEE 67 (5), Pp 786- 804, <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M., Fernandez, L., (2000). **Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis**, Water Res, 2000, Volume 34, Pp 807- 816.
- Jain, A.K., Tuceryan, M., (1992). **Texture analysis**, chapter 11 in the Handbook of pattern recognition and computer vision by C.H.Chen, 1992, 315 p.
- Javhar, A., Chen, X., Bao, A., Jamshed, A., Yunus, M., Jovid, A., Latipa, T., (2019). **Comparison of Multi-Resolution Optical Landsat-8, Sentinel-2 and Radar Sentinel-1 Data for Automatic Lineament Extraction: A Case Study of Alichur Area, SE Pamir**, Remote Sens, 11, Pp 778- 789, doi:10.3390/rs11070778.
- Jenifer, M.A., Jha, M.K., (2017). **Comparison of Analytic Hierarchy process, Catastrophe and Entropy techniques for evaluating groundwater prospect of hard-rock aquifer systems**, J. Hydrol, (Amst) 548, Pp 605- 624.
- Khosroshahizadeh, S., Pourkermani, M., Almasian, M., Arian, M., Khakzad, A., (2016). **Lineament patterns and mineralization related to alteration zone by using ASAR-ASTER imagery in hize jan-sharaf abad au-ag epithermal mineralized zone (east azarbaijan—NW Iran)**, Open J. Geol. 6, Pp 232- 250, <https://doi.org/10.4236/ojg.2016.64021>.
- Lee, S., Lee, C.W., (2015). **Application of decision-tree model to groundwater productivity potential mapping**, Sustainability 2015, 7, Pp 13416- 13432, Link: <https://doi.org/10.4236/ojg.2015.511070>.
- Masoumi, F., Eslamkish, T., Abkar, A.A., Honarmand, M., Harris, J.R., (2017). **Integration of spectral, thermal, and textural features of ASTER data using Random Forests classification for lithological mapping**, J. Afr. Earth Sci. Vol 46, No 11, Pp 2286-2289, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.01.028>.
- Oh, H., Kim, Y., Choi, J., Park, E., Lee, S., (2011). **GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea**, Journal of Hydrology, Volume 399, Issue3- 4, Pp 158- 172.
- Pourtaghi, Z.S., Pourghasemi, H.R., (2014). **GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran**, Hydrogeol. J. 2014, 22, Pp 643- 662.
- Rajasekhar, M., Raju, G.S., Sreenivasulu, Y., Raju, R.S., (2019). **Delineation of groundwater potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzy logic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches**, HydroResearch 2 (2019), Pp 97- 108, <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.11.006>.
- Sukumar, M., Selva, M.S., (2015). **Discriminating lineaments from the aster image by analyzing the object properties**, Int. J. Adv. Technol. Eng. Sci. 03 (01), Pp 2348- 7550.
- Tseng, M.L., Lin, Y.H., Chiu, A.S.F., Chen, C.Y., (2008). **Fuzzy AHP approach to TQM strategy evaluation**, IEMS 7 (1), Pp 34- 43.