

Evaluating and detecting potential of groundwater resources using Fuzzy-AHP method and remote sensing data (Case study: Bam-Narmashir plain)

Afsaneh Haghghi¹, Mohamad Nohtani¹, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno¹, Elham Rafiei Sardooi^{2*}

- 1- Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
- 2- Department of Ecological Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

*Corresponding Author: ellrafiei@ujiroft.ac.ir

(Received: 11 May 2023

Revised: 03 June 2023

Accepted: 12 June 2023)

Extended Abstract

Introduction: Detecting the potential of groundwater resources is one of the most important methods of water exploitation management to deal with water shortage, which is inevitable due to the growing need for water in the country. The first step in managing groundwater resources is to recognize the potential of groundwater. Fuzzy-Analytic Hierarchy Process (AHP) is also recognized as an important tool in decision-making about natural resources management, especially water resources. Bam-Narmashir plain, in Kerman province, is one of the most important plains of the country. This plain plays a very important role in the region in terms of supplying the water resources needed by agriculture, industry and drinking parts.

Materials and methods: In this study, AHP-fuzzy model and GIS were used to identify suitable areas for potential groundwater resources in Bam-Narmashir plain. Criteria such as rainfall, temperature, geographical direction, slope, land use, vegetation cover, distance from the road, distance from the river, distance from the fault, distance from the city and village, distance from wells and springs, soil texture and the permeability of the formation were selected for decision making and the weight of each of them was calculated and prioritized using AHP model. Then, the desired layers were fuzzy and indicator maps were prepared using Arc GIS software. Then, the groundwater potential map was prepared. Finally, the ROC curve was used to validate the groundwater potential map in the region.

Results and Discussion: The result of ROC curve indicated the high accuracy of Fuzzy-AHP method in preparing the groundwater potential map in the study area. The results were consistent with the results of researchers such as Rezaei Moghadam *et al.* (2017) and Faraji Sabokbar *et al.* (2011). Also, the results showed that the regions with geological sub-criteria have the highest weight of 0.614 and the climatic sub-criteria have the lowest weight of 0.117. The value of inconsistency ratio was 0.07, which is smaller than 0.1, and it indicates consistency in the opinions and judgments of research decision-makers. Finally, the results showed that about 7.77% of the total area of the plain, equivalent to 755.54 square kilometers, is suitable for the implementation of underground water resources potential detection systems. Also, 1.57, 31.71, 58.98 and 7% of plain lands have very weak, weak, medium, and high potential for finding the potential of underground water resources, respectively.

The results showed a sparse distribution of suitable areas for groundwater potential in Bam-Narmashir plain, which is compatible with the results of Sekar and Randir (2007), who stated that the groundwater recharge potential at the scale of the watershed has non-uniform spatial distribution. The results showed that in the northern and western part of the plain, where the soil is mostly low capacity for groundwater potential and infiltration, which is in line with the results of Akbarpour *et al.* (2015), who stated in west and north-west of Birjand basin, the soil has a low capacity for groundwater penetration due to the low depth of the soil and high slope.

Conclusion: In recent years, the use of geographic information system (GIS) and its combination with multi-criteria and decision-making methods to obtain more accurate results have increased and played a key role in studies of the finding potential of groundwater resources. Even though it is very difficult and complicated to accurately identify suitable places for the potential of underground water resources, this study showed that the use of GIS makes it possible to identify these suitable places with minimal facilities, which is consistent with the findings of Khairkhan *et al.* (2013). Overall, according to the results of this study, about 7% of the region has high groundwater potential. Therefore, it is necessary to adopt scenarios to reduce the over-exploitation of groundwater and to apply the measures to improve the irrigation systems, the methods to reduce evaporation and improve the cultivation system.

Keywords: Groundwater potential, Fuzzy-AHP, Remote sensing, Bam-Narmashir plain, GIS.

Citation: Haghghi, A., Nohtani, M., Dahmardeh Ghaleno, M.R. & Rafiei Sardooi, E. (2023). Evaluating and detecting potential of groundwater resources using Fuzzy-AHP method and remote sensing data (Case study: Bam-Narmashir plain). *Integrated Watershed Management*, 3 (1), 16-37. doi: 10.22034/iwm.2023.2001770.1075

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to **Integrated Watershed Management**. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



ارزیابی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش سلسله مراتبی-فازی (Fuzzy-AHP) و داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: دشت بم-نرماشیر)

افسانه حقیقی^۱، محمد نهتانی^۱، محمدرضا دهمرده قلعه نو^۱، الهام رفیعی ساردوئی^{۲*}

۱- گروه آموزشی مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب‌و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- گروه آموزشی مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

*نویسنده مسئول: ellrafiei@ujiroft.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

چکیده

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین روش‌های مدیریت بهره‌برداری از آب برای مقابله با کم‌آبی است. در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت بم-نرماشیر از مدل سلسله فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. معیارهای موردنظر از جمله بارندگی، دما، جهت جغرافیایی، شیب، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، پوشش گیاهی، فاصله از چاه و چشمه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از شهر و روستا، بافت خاک و قابلیت نفوذپذیری سازند برای تصمیم‌گیری انتخاب شدند و وزن هریک از آن‌ها با بهره‌گیری از مدل AHP محاسبه و اولویت‌بندی شدند. سپس لایه‌های موردنظر فازی گردیده و نقشه‌های شاخص‌ها در محیط ArcGIS تهیه شد، پس از آن نقشه‌ی نهایی پتانسیل آب زیرزمینی آماده گردید. در نهایت برای اعتبارسنجی نقشه‌ی پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی در منطقه از منحنی ROC استفاده شد که نتیجه ارزیابی با استفاده از این منحنی، حاکی از دقت زیاد این روش در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده‌ی مطالعاتی است. همچنین نتایج نشان داد مناطق با زیرمعیارهای زمین‌شناسی بیشترین وزن (۰/۶۱۴) و اقلیمی کمترین وزن (۰/۱۱۷) را به خود اختصاص داده‌اند. مقدار نرخ ناسازگاری در این طرح ۰/۰۵ به دست آمد که مقداری کوچک‌تر از ۰/۱ است و نشان‌دهنده رعایت سازگاری در نظرات و قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان تحقیق است. در نهایت نتایج نشان داد که حدود ۷/۷۷ درصد از مساحت کل دشت معادل ۷۵۵/۵۴ کیلومترمربع مناسب جهت اجرای سامانه‌های پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی است. همچنین ۱/۵۷، ۳۱/۷۱، ۵۸/۹۸ و ۷ درصد از اراضی دشت به ترتیب دارای استعداد خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط و زیاد برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی می‌باشند.

کلیدواژه: پتانسیل آب زیرزمینی، سلسله مراتبی-فازی، سنجش از دور، دشت بم-نرماشیر، GIS

استناد: حقیقی، ا.، نهتانی، م.، دهمرده، م. ر. و رفیعی ساردوئی، ا. (۱۴۰۲). ارزیابی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش سلسله مراتبی-فازی (Fuzzy-AHP) و داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: دشت بم-نرماشیر). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۳(۱)، ۱۶-۳۷.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از باارزش‌ترین منابع طبیعی است که حدود ۳۴ درصد از منابع آب شیرین جهان را تشکیل می‌دهد (Murmu *et al.*, 2019). همچنین استفاده از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان جایگزینی قابل‌اعتماد، با گسترش سکونت در مناطقی که آب سطحی وجود ندارد یا مقدار آن کم است، موردتوجه قرار گرفته است، به‌طوری‌که در برخی از مناطق، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان تنها و مهم‌ترین منبع تأمین آب به حساب می‌آید (Monavari *et al.*, 2012)؛ بنابراین به دلیل در دسترس نبودن آب‌های سطحی، منابع آب زیرزمینی در تأمین آب مصرفی در بیش‌تر موارد همانند کشاورزی، شرب و صنعت نقش اساسی دارند چنان‌که طبق آخرین آمار، ۵۵٪ از نیاز آبی کشورمان از طریق آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود که در چند سال اخیر به علت وقوع خشک‌سالی، افزایش جمعیت، کمبود منابع آب سطحی و تأثیر تغییرات آب‌وهوایی در سطح جهان استفاده از آب‌های زیرزمینی در کشورمان به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است در نتیجه باید در مدیریت آب‌ها دقت بالایی صورت بگیرد (Abrishamchi *et al.*, 2020). تغذیه آب‌های زیرزمینی هنگامی اتفاق می‌افتد که جریان آب از سطح اساس آب زیرزمینی عبور می‌کند و سپس به درون منطقه اشباع تراوش می‌نماید (Mahmudian, 2013). از اساسی‌ترین فاکتورهای مؤثر بر وجود شکل‌گیری سفره‌های آبدار و حرکت آب زیرزمینی در یک ناحیه شامل توپوگرافی، سنگ‌شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی، عمق هوازدگی، فضای شکستگی‌ها، تخلخل اولیه، تخلخل ثانویه، شیب، الگوهای زهکشی، پوشش زمین و شرایط اقلیمی است (Soori *et al.*, 2017)؛ لذا شناخت و مکان‌یابی منابع آب زیرزمینی، شناسایی مناطق با پتانسیل بالا و اصلاح روش‌های برداشتی از منابع فوق جز اولویت‌های مهم تحقیقات

منابع آبی و یکی از اساسی‌ترین چالش‌های موردبحث است (Jha *et al.*, 2009). یکی از منابع اصلی جمع‌آوری اطلاعات، سنجش‌از‌دور است که در مورد عوارض سطحی مربوط به آب‌های زیرزمینی مانند سنگ‌شناسی و عوارض ساختاری و کاربری اراضی پرکاربرد است. این دسته از اطلاعات می‌تواند به‌سادگی به‌عنوان ورودی محیط GIS برای یکپارچه‌سازی با سایر داده‌ها و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها استفاده شود (Oh *et al.*, 2011). سنجش‌از‌دور علاوه بر اینکه دامنه‌ی بزرگ‌مقیاسی از مشاهدات گسترده‌ی زمانی و مکانی را فراهم می‌کند، باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه نیز می‌شود (Musavi *et al.*, 2003). یکی دیگر از ابزارهای مدیریتی که امروزه بسیار موردتوجه قرار گرفته است، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش‌ها قابلیت استفاده در تحلیل و پشتیبانی تصمیمات مختلف حتی در مواقعی که اهداف چندگانه و متناقض وجود دارد را دارا است (Soori *et al.*, 2017)؛ بنابراین یافتن مکان‌های مستعد با استفاده از شیوه‌های نوین علمی می‌تواند از هدررفت هزینه‌های احداث چاه جلوگیری نموده و اجرای طرح‌ها را از نظر اقتصادی توجیه نماید. پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به ما اجازه می‌دهد با صرف هزینه کمتر به شناسایی منابع آب زیرزمینی بپردازیم. علاوه بر این، چنین نقشه‌هایی ابزارهای مفیدی را برای برنامه‌ریزان و مهندسان در شناسایی مکان‌های مناسب برداشت آب زیرزمینی فراهم می‌کنند. به‌طوری‌که امکان اجرای موفق عملیات حفاظت و نگهداری برنامه‌های مدیریتی آب زیرزمینی را نیز فراهم می‌گرداند. ممکن است در مناطق با پتانسیل پایین آب زیرزمینی چندین چاه حفر شده باشد. با توجه به نقشه تهیه‌شده می‌توان استخراج از این مناطق را کاهش داد و به بهره‌برداری از مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی پرداخت. از این‌رو، نتایج حاصل از این پتانسیل‌یابی می‌تواند برای

به دلیل مقادیر عظیمی از رسوب در فصل موسمی، تحت کیفیت "آب بد" با غلظت آرسنیک بالا (AS) در طی سال‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. Castillo و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش سلسله مراتبی (AHP) و داده‌های سنجش‌ازدور در حوزه آبخیز سانلویس پوتوسی در کشور مکزیک پرداختند. در این تحقیق هفت لایه (زمین‌شناسی، تراکم خطی، کاربری و پوشش زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، بارندگی، تراکم زهکشی و شیب) تهیه گردید. پس از روش AHP و تخصیص رتبه، لایه‌ها با استفاده از محاسبه‌گر رستری برای به دست آوردن نقشه GWPZs یکپارچه شدند. نتایج حاکی از آن است که ۶۸/۲۱ درصد از مساحت منطقه به‌عنوان پتانسیل کم آب زیرزمینی و ۲۶/۳۰ درصد در طبقه متوسط قرار دارند. اعتبارسنجی با ارزیابی داده‌های زمان ماند آب از ۱۵ حلقه چاه توزیع‌شده در منطقه مورد مطالعه انجام شد. علاوه بر این، منحنی ویژگی‌های عملیاتی گیرنده (ROC) به دست آمد که نشان‌دهنده دقت رضایت‌بخش (AUC=0.677) است. Rahaman و همکاران (۲۰۲۲) به پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های روش سلسله مراتبی-فازی (Fuzzy-AHP) و تکنیک‌های جغرافیایی در حوزه آبخیز رودخانه توبال در مانپور هند پرداختند. تأثیر پارامترهای ژئومورفولوژی، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی، شیب، بارندگی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، کاربری/پوشش زمین (LULC) و انحنا، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که از کل مساحت حوضه، سه حوضه (SW3، SW4 و SW7) با ۴۳/۶ درصد مساحت دارای پتانسیل متوسط آب زیرزمینی هستند. بررسی مرور منابع نشان‌دهنده این

سیاست‌گذاران مدیریت منابع آب زیرزمینی در طرح‌های آینده مفید واقع شود.

تاکنون پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام گرفته است. Kasiri و همکاران (۲۰۲۰) در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در دشت ناز ساری بیان نمودند که عوامل زمین‌شناسی و ارتفاع منطقه بیشترین تأثیر را بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در منطقه بررسی شده دارند. Duan و همکاران (۲۰۱۶) بیان داشتند که در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و الگوریتم C5.0 در تبت چین چهار درجه از مناطق پتانسیل آب زیرزمینی بسیار خوب، خوب، متوسط و ضعیف به ترتیب ۴/۶۱، ۸/۵۸، ۲۶/۵۹ و ۶۰/۲۳ درصد به دست آمد.

Baharvand و همکاران (۲۰۲۰) در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از سلسله مراتبی فازی در حوزه آبخیز خرم‌آباد بیان نمودند که به ترتیب ۴/۵ و ۹/۴ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های فاقد پتانسیل و پتانسیل بالا قرار دارند. بیشترین پتانسیل تشکیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای آهکی و کنگلومراهای کواترنری واقع شده است.

Chaudhry و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تکنیک زمین‌آمار و تحلیل سلسله مراتبی فازی بیان داشتند که ۲۰/۴۴ درصد از پنجاب پاکستان در کلاس عالی و مناطق متوسط و ضعیف در مجموع ۷۹/۵۵ درصد از مناطق جهت پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی را در برمی‌گیرند. Minh و همکاران (۲۰۱۹) در ارزیابی تغییرات مکانی و جزئی از کیفیت آب‌های زیرزمینی در جیانگ ویتنام برای یک دوره ده‌ساله از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ بر اساس فرایند سلسله‌مراتب تحلیلی فازی (Fuzzy-AHP) دریافتند که چاه‌های کم‌عمق در مناطق شمال شرقی و جنوب شرقی این منطقه عمدتاً

بهره‌برداری به‌منظور کاهش خسارات ناشی از برداشت آب زیرزمینی و همچنین بهره‌گیری مطلوب و استاندارد از منابع آبی، تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در این منطقه که در مناطق بیابانی جنوب شرق ایران با اقلیم فراخشک قرار گرفته است (Rezayi *et al.*, 2013) ضرورت می‌یابد.

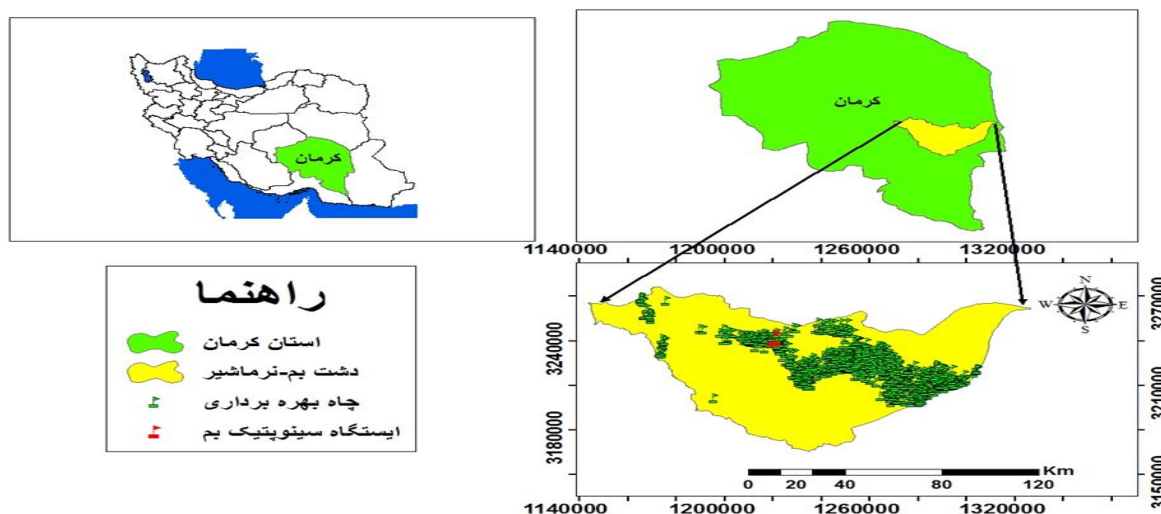
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی دشت بم-نرماشیر واقع در جنوب شرقی مرکز استان کرمان است که تقریباً در جنوب شرق کشور ایران و حوزه آبخیز لوت واقع شده است. مساحت، متوسط بارش سالانه و ارتفاع متوسط این دشت از سطح دریا به ترتیب $۸۰۱۸/۶۹$ کیلومتر مربع، $۵۸/۴۶$ میلی‌متر و ۹۶۰ متر است که بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن این دشت در طبقه‌بندی اقلیمی فراخشک قرار می‌گیرد و در محدوده $۵۷^{\circ}۳۸'۵۹''$ تا $۵۹^{\circ}۴۳'$ طول شرقی و $۲۸^{\circ}۳۴'۴۰''$ تا $۲۹^{\circ}۳۶'۱۲''$ عرض شمالی واقع گردیده است. همچنین تعداد چاه‌های بهره‌برداری در این دشت ۱۲۸۱ حلقه چاه است. موقعیت این دشت در شکل (۱) ارائه شده است (Rezayi *et al.*, 2013).

نکته مهم است که پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارها در مدیریت بهینه از منابع آب است. مدیریت و جلوگیری از تشدید مشکلات در منابع آب، از طریق اکتشاف و بهره‌برداری متناسب با پتانسیل منابع آب زیرزمینی است. از سویی دیگر روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به دلایل سادگی و همچنین استفاده از نظریات و تجربیات کارشناسان، در صورتی که با منطق فازی ترکیب گردد، کاربرد بسیار مناسبی در ارزیابی پتانسیل منابع آب دارد. همچنین در نظر گرفتن وزن‌های درون لایه‌ای و برون لایه‌ای و وزن تلفیقی آن‌ها می‌تواند اطلاعات مهمی را در زمینه اهمیت زیرمعیارها برای برنامه‌ریزان فراهم می‌کند که در مطالعات پیشین، وزن‌های درون لایه‌ای در روش سلسله‌مراتبی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو در این پژوهش به ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت بم-نرماشیر با استفاده از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی پرداخته شد.

دشت بم-نرماشیر یکی از دشت‌های مهم کشور به‌خصوص استان کرمان است. این دشت از نظر تأمین منابع آبی مورد نیاز بخش کشاورزی، صنعت و شرب نقش بسیار مهمی را در منطقه ایفا می‌کند؛ لذا با توجه به اهمیت شناسایی منابع آبی و پتانسیل آن‌ها در



شکل ۱- موقعیت دشت بم-نرماشیر در استان کرمان و کشور ایران

Figure 1- Location of Bam-Narmashir plain in Kerman province and Iran

انتخاب پارامترها

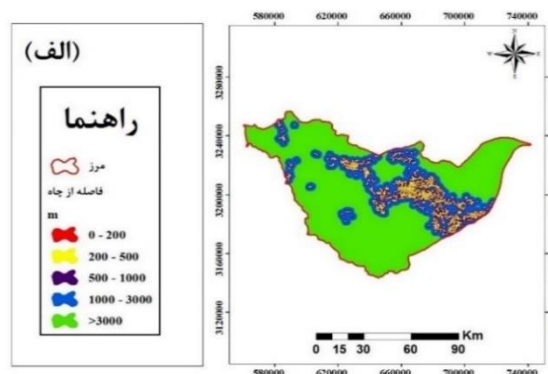
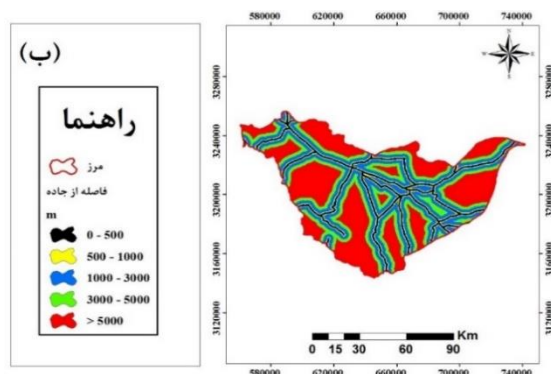
در پژوهش حاضر در مرحله اول با استفاده از مطالعه منابع، پژوهش‌های انجام‌شده و اطلاعات قابل‌دسترس، عوامل تأثیرگذار بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی شناسایی و تعیین گردید. بر این اساس سه معیار اقتصادی (فاصله از چاه و چشمه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و فاصله از روستا)، اقلیم (دما و بارش) و زمین‌شناسی (بافت خاک، پوشش گیاهی (NDVI)، قابلیت نفوذپذیری سازند، کاربری اراضی، درصد شیب، جهت جغرافیایی، تراز آب زیرزمینی و طبقات ارتفاعی) انتخاب و نقشه آن‌ها تهیه گردید (شکل ۲).

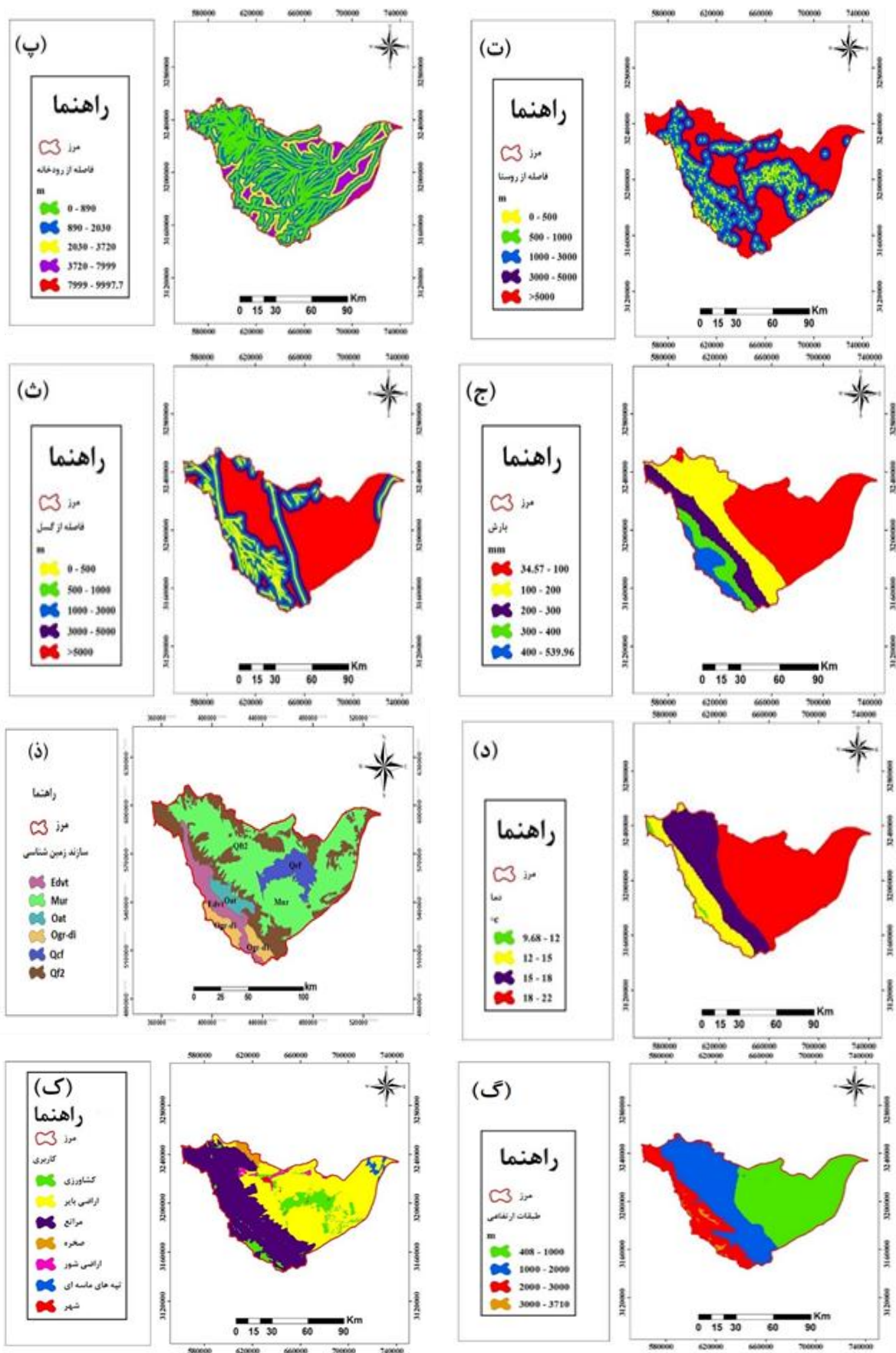
در این پژوهش اطلاعات چاه‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه در سال ۱۳۹۹ از اداره آب منطقه‌ای استان کرمان تهیه گردید. لایه‌های فاصله از چاه، جاده، رودخانه، روستا و گسل با استفاده از دستور Line density در ArcGIS تهیه گردید (شکل‌های ۲ الف تا ۲ ث). داده‌های دما و بارش ایستگاه سینوپتیک بم و ایستگاه‌های اطراف در دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۹ تهیه و نقشه پهنه‌بندی دما و بارش بر اساس روش درون‌یابی کریجینگ در ArcGIS 10.8 تهیه گردید (شکل ۲ ج و ۲ د). در این پژوهش، نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه‌شده توسط سازمان

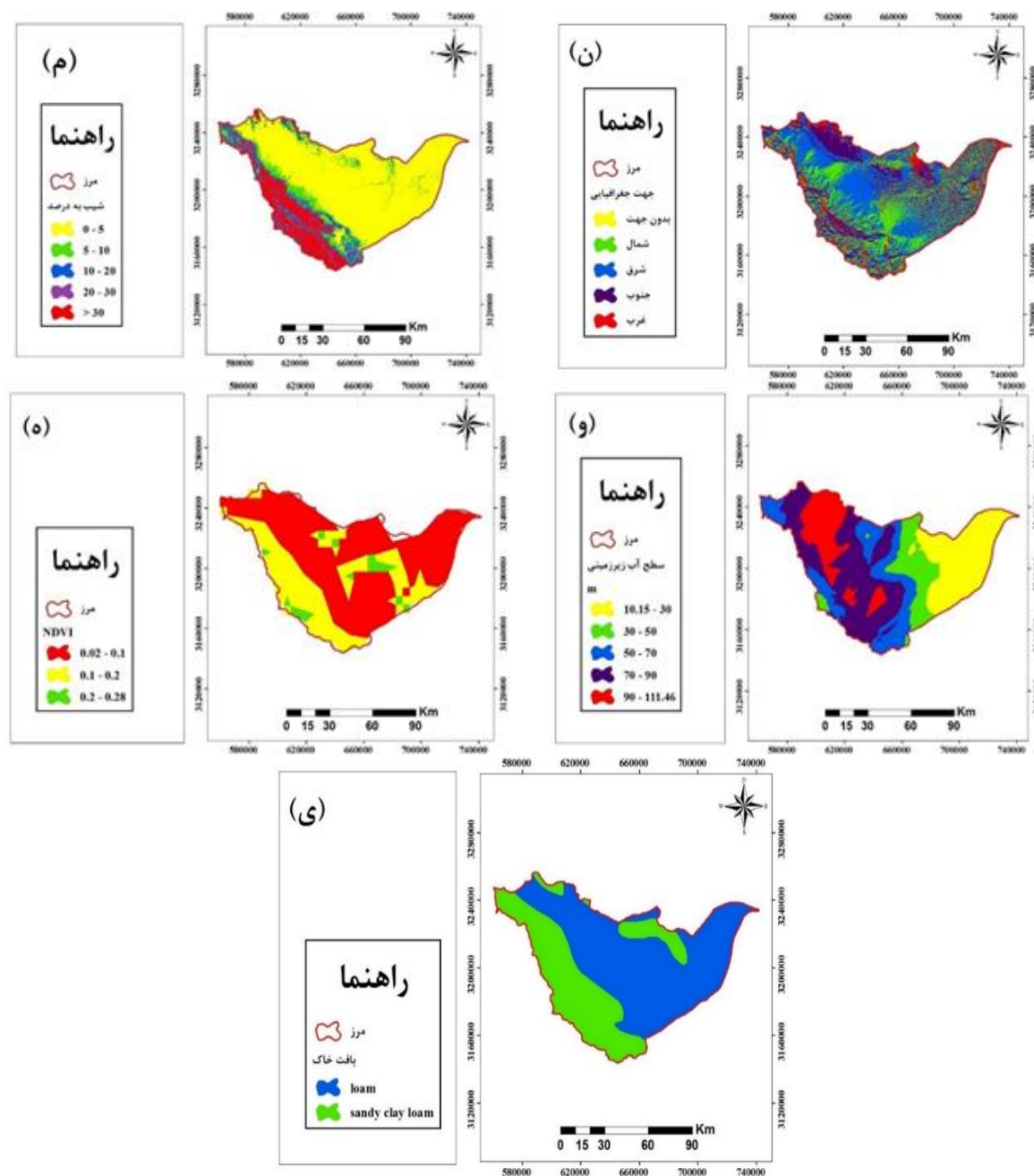
زمین‌شناسی کشور استفاده گردید (شکل ۲ ذ). نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۹۹ منطقه مورد مطالعه بر اساس تصاویر لندست ۸ و روش طبقه‌بندی نظارت‌شده پیشینه درست‌نمایی^۱ تهیه و به هفت دسته اراضی مرتعی، کشاورزی، بایر، صخره، اراضی شور، تپه‌های ماسه‌ای و شهری طبقه‌بندی گردید (شکل ۲ ک). با استفاده از رقوم‌سازی نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری در GIS، نقشه مدل رقوم ارتفاع ۳۰*۳۰ متر تهیه و نقشه ارتفاع و شیب و جهت منطقه از آن استخراج گردید (شکل‌های ۲ گ تا ۲ ن). در این پژوهش نقشه سطح آب زیرزمینی (سال ۱۳۹۹) دشت با استفاده از درون‌یابی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی در سطح منطقه تهیه شد (شکل ۲ و). لایه NDVI (شکل ۲ ه) بر اساس تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و رابطه (۱)، با ترکیب NIR (باند مادون قرمز نزدیک، باند ۵ لندست ۸) و RED (باند قرمز، باند ۴ لندست ۸) محاسبه گردید (Testa et al., 2018).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

به‌منظور استخراج داده‌های مربوط به بافت خاک از طریق سایت soilgrids.org دو کلاس بافت خاک دانلود و در نهایت در نرم‌افزار SAGA نقشه بافت خاک منطقه تهیه گردید (شکل ۲ ی).







شکل ۲- پارامترهای تأثیرگذار بر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در دشت بم-نرماشیر الف) فاصله از چاه و چشمه ب) فاصله از جاده پ) فاصله از آبراهه ت) فاصله از روستا ث) فاصله از گسل ج) بارندگی د) دما ذ) سازندهای زمین‌شناسی ک) کاربری اراضی گ) طبقات ارتفاعی م) درصد شیب ن) جهت جغرافیایی و) تراز آب زیرزمینی ه) شاخص پوشش گیاهی
 ی) NDVI بافت خاک

Figure 2- Parameters affecting the potential of underground water resources in Bam-Narmashir plain a) Distance to wells and springs b) Distance to road c) Distance to river d) Distance to village e) Distance to fault f) Rainfall g) Temperature h) Geological formations i) Land use j) Elevation k) Slope (%) l) Geographical aspect m) Groundwater level n) NDVI o) Soil texture

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

در این مطالعه از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به‌عنوان یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار بر پتانسیل‌یابی مناطق مستعد پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده گردید. این روش یکی از کامل‌ترین سیستم‌های طراحی‌شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، چراکه این تکنیک توانایی فرموله کردن مسئله را به‌صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان این را دارد که معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مسئله در نظر بگیرد. این فرآیند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخیل نموده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد. علاوه بر این بر مبنای مقایسه زوجی بنا نهاده شده که قضاوت و محاسبات را آسان‌تر می‌کند. از مزایای این روش این است که اعمال نظر کارشناسی توسط افراد را تا حدود زیادی آسان‌تر کرده و احتمال خطا را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و همچنین در این روش امکان دخالت دادن تعداد زیادی از عوامل وجود دارد و با استفاده از نظر کارشناسی وزن هر یک از عوامل را به دست آورد.

مراحل اجرای روش AHP

تحلیل سلسله مراتبی ۴ مرحله دارد:

- ۱- ایجاد درخت سلسله مراتبی: انتخاب معیارها و فاکتورهای تأثیرگذار بر هدف
- ۲- مقایسات زوجی: مقایسات زوجی توسط گروه کارشناس خبره و نرم‌افزار Expert_Choice 11 انجام شد. در این مرحله ماتریس وزن جهت مقایسه با توجه به عوامل مؤثر، تشکیل و این عوامل دوبه‌دو با هم مقایسه می‌گردند. تمام مقایسه‌ها در تحلیل سلسله مراتبی به‌صورت زوجی انجام می‌پذیرد. در این مقایسه تصمیم‌گیرندگان از قضاوت شفاهی استفاده می‌کنند.

این قضاوت‌ها در سال ۱۹۸۰ توسط ساعتی به مقدار کمی بین صفر الی ۹ تبدیل‌شده است (جدول ۱).
 ۳- نرمال‌سازی و تعیین اولویت‌ها: از مفهوم نرمال‌سازی و میانگین موزون به‌منظور تعیین میزان تأثیر عامل استفاده می‌شود. بر این اساس گزینه‌های مختلف بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نظر هر معیار با هم مقایسه شده و سپس توسط میانگین وزنی، نرمال‌سازی می‌گردند. بدین‌صورت اولویت هر گزینه به دست می‌آید.
 ۴- محاسبه وزن یا میزان اثربخشی هر یک از عوامل: روش‌های متفاوتی برای محاسبه میزان تأثیر و وزن هر عامل ارائه‌شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از روش حداقل مربعات، روش حداقل مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه، روش‌های تقریبی شامل جمع سطرها و جمع ستون‌ها و میانگین هندسی. در حال حاضر دقیق‌ترین روشی که در نرم‌افزار Expert choice استفاده می‌شود، روش میانگین هندسی است.

۵- پس از وزن دهی، نرخ ناسازگاری وزن‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد. در حالت کلی اگر نرخ ناسازگاری (CR) کمتر از ۰/۱ باشد ناسازگاری قابل‌قبول است و در حالتی که بیش‌تر از این مقدار باشد باید در قضاوت‌های صورت گرفته بازنگری انجام بگیرد. درواقع CR تعیین‌کننده صحت وزن دهی انجام‌شده است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

که در آن CI شاخص سازگاری و RI شاخص تصادفی است که مقدار آن با توجه به تعداد فاکتور مورد مقایسه (جدول ۲) محاسبه می‌گردد (Soori et al. 2017).

در این پژوهش نرخ ناسازگاری مربوط به اوزان ۵٪ بوده که قابل‌قبول است، نهایتاً بر اساس اطمینان حاصله، امتیاز مربوط به هریک از معیارها و زیرمعیارها در مکان‌یابی مناطق مناسب به‌دست آمد.

جدول ۱- مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی در روش تحلیل سلسله مراتبی

Table 1- Preference values for pairwise comparisons in the AHP method

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
9	کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر و یا کاملاً مطلوب‌تر
7	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی
5	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی
3	کمی مرجح یا کمی مهم‌تر و یا کمی مطلوب‌تر
1	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان
8, 6, 4, 2	ترجیحات بین فواصل فوق

جدول ۲- شاخص تصادفی بودن (RI)

Table 2- Randomness Index (RI)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.54

بین طبقات را مشخص می‌نماید اقدام به کلاس‌بندی مناطق مستعد در چهار کلاس مناسب، نسبتاً مناسب، متوسط و نامناسب گردید.

روش فازی

در این قسمت با در نظر گرفتن فاکتورهای مؤثر بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی و تعیین نوع و شکل تابع عضویت، در مقیاس پیوسته مطلوبیت (بایت، صفر تا ۲۵۵) نرمال شدند. برای هر یک از عوامل، نقشه‌های محدودیت (مناطق) از هر فاکتور که شرایط رویشگاهی را ندارد) نیز در نظر گرفته شدند. در این روش تعیین درجه عضویت فازی بر اساس توابع عضویت و تهیه نقشه فازی هر یک از عوامل (استانداردسازی لایه‌ها) صورت می‌گیرد. در استانداردسازی لایه‌ها، تئوری فازی دارای کل تئوری‌هایی است که از مفاهیم اساسی مجموعه‌های فازی یا توابع عضویت استفاده می‌نماید (Prasad *et al.*, 2008, Chung & Fabbri, 1993, Zadeh, 1973). در تئوری فازی بحث تابع عضویت و چگونگی تعریف آن یکی از اساسی‌ترین مباحث است. اساس اختلاف روش‌های فازی با سایر روش‌ها، در

طبقه‌بندی مجدد و ارزش‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی

در این مرحله هر یک از لایه‌های اطلاعاتی موجود به چندین طبقه معین و مشخص تقسیم گردیده و پس‌از آن بر اساس ۱ تا ۹ که یک کمترین ارزش و ۹ بیش‌ترین را داراست به‌صورت جداگانه جهت طبقه‌بندی مجدد و ارزش‌گذاری شدند.

هم‌پوشانی و تلفیق به روش ترکیب خطی وزنی

در تحقیق حاضر هم‌پوشانی نقشه‌های معیارها و نقشه‌های نهایی مطابق رابطه (۳) صورت گرفت که بر پایه میانگین وزنی استوار است (Eskandari *et al.*, 2012).

$$A_i = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij} \quad (3)$$

در این رابطه A_i ضریب مربوط به میزان مناسب بودن سلول i ام، W_j وزن معیار j ام، X_{ij} مقدار سلول i در معیار j ام و n تعداد کل معیارها است. در این روش مجموع وزن معیارها برابر با ۱ است در غیر این صورت مقدار A_i بر مجموع وزن معیارها تقسیم می‌شود.

در نهایت نقشه نهایی مناطق مستعد پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، بر اساس روش شکست که بر اساس توزیع نرمال داده‌های است و نقاط عطف داده‌ها مرز

فازی شده و هم‌پوشانی لایه‌ها، نقشه پهنه‌بندی مناطق پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی تهیه شد.

اعتبارسنجی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی

جهت این امر از منحنی ROC که به‌منظور تعیین میزان دقت مدل‌های پیش‌بینی مکانی و روش‌های داده‌کاوی، روش کمی و گرافیکی مناسبی به حساب می‌آید، استفاده می‌شود. در این روش برای بررسی دقت نقشه نهایی، از آمار ۳۰ درصد چاه‌ها که در پتانسیل-یابی استفاده نشده، بهره گرفته می‌شود (Shahbazi *et al.*, 2013). در این منحنی میزان مثبت واقعی (بر روی محور x) و میزان مثبت کاذب (بر روی محور Y) در آستانه‌های مختلف نشان داده می‌شود (Kumar & Indrayan, 2011). زمانی که حساسیت افزایش یابد، میزان مثبت کاذب نیز افزایش می‌یابد، لذا منحنی ROC این امکان را می‌دهد تا میزان مثبت واقعی و کاذب را در هر نقطه بر روی منحنی بررسی و مقایسه نماییم (Akobeng, 2007). مساحت زیر این منحنی (AUC^1)، میزان دقت نقشه نهایی به صورت کمی و توانایی مدل در پیش‌بینی درست را نشان می‌دهد. مساحت ذکر شده توسط نرم‌افزارهای آماری همچون SPSS با استفاده از اطلاعات استفاده نشده‌ای که برای اعتبارسنجی به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود، محاسبه می‌گردد. در صورت ایده‌آل بودن مقدار زیر نمودار، برابر یک خواهد بود. این شاخص مناسبی جهت ارزیابی صحت مدل است (Hashemi *et al.*, 2004).

نتایج

وزن‌های درون لایه‌ای

بعد از وارد نمودن مقایسه‌های زوجی در نرم‌افزار Expert Choice، وزن درون لایه‌ای هر کدام از لایه‌ها محاسبه گردید که نتایج آن در شکل‌های (۵ تا ۱۷)

تعریف تابع عضویت است. در تعریف تابع عضویت درجه تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیرمجموعه‌های آن است و به صورت $Mc(X)$ نمایش داده می‌شود. برای یافتن تابع عضویت هیچ الگوریتم مشخصی وجود ندارد بلکه تجربه، نوآوری و حتی اعمال نظر شخصی در شکل‌گیری و تعریف تابع عضویت می‌تواند مؤثر واقع شود. (Dixon, 2005)؛ لذا در این تحقیق با استفاده از توابع عضویت خطی $Ms\ small$ و $Ms\ larg$ و همچنین تابع عضویت Userdefined نقشه‌های هر یک از عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در محدوده دشت بم-نرماشیر به نقشه‌های فازی تبدیل می‌شوند. با در نظر گرفتن این که در منطقه‌ی کلاسیک، وزن دهی هر عامل، بخش‌هایی که تا حدودی از نظر ویژگی‌های دیگر مشابه بوده انتخاب می‌شود و با مشاهده تغییرات این عامل و تأثیر آن بر پتانسیل‌یابی بر اساس نظر و دید کارشناس نسبت به منطقه عوامل به صورت جفتی با یکدیگر مقایسه می‌شوند و یکی از وزن‌های جدول انتخاب می‌گردد که بستگی به دقت و درجه‌ی آشنایی کارشناس با منطقه دارد (Jasmin and Mallikarjuna, 2011). برای وزن‌دار کردن داده‌های مورداستفاده، بعد از اولویت‌بندی بر اساس نظرات کارشناسان خبره، از نرم‌افزار Expert choice استفاده شد (Soltani, 2017). بعد از تعیین وزن عامل‌های مورداستفاده، عامل‌ها برای وزن‌دار شدن به روش فازی، وارد محیط GIS شده و وزن نرمال عامل‌ها به وزن فازی تبدیل و نقشه فازی تهیه گردید. سپس نقشه‌های تهیه‌شده بر اساس عملگرهای فازی $\text{Sum, Or, And, Product}$ و Gamma در محیط GIS با هم هم‌پوشانی شده و خروجی نهایی به‌عنوان نقشه پهنه‌بندی تهیه گردید (Sadeghi & Khalajmasoumi, 2015). در نهایت با ضرب وزن‌های به‌دست‌آمده از روش سلسله مراتبی، در هر یک لایه‌های

سازند زمین‌شناسی با نفوذپذیری بالا، کاربری اراضی کشاورزی، سطح آب زیرزمینی بالا، ارتفاع کم، جهت جغرافیایی مسطح، فاصله کم نسبت به شهر و روستا، جاده و رودخانه و فاصله زیاد نسبت به گسل و چاه‌ها دارای بیش‌ترین وزن و اهمیت جهت پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی هستند (شکل‌های ۵ تا ۱۷).

Priorities with respect to:
Goal: Groundwater
>climate
>Temperature



شکل ۴- وزن‌های محاسبه‌شده برای مقادیر مختلف دما

Figure 4- Calculated weights for different temperature values

Priorities with respect to:
Goal: Groundwater
>geology
>Soil



شکل ۶- وزن‌های محاسبه‌شده برای بافت خاک

Figure 6- Calculated weights for soil texture

Priorities with respect to:
Goal: Groundwater
>geology
>Sazand



شکل ۸- وزن‌های محاسبه‌شده برای نفوذپذیری سازند

زمین‌شناسی

Figure 8- Calculated weights for formation permeability

ارائه‌شده است. وزن دهی باید به‌گونه‌ای باشد که ناسازگاری سامانه کمتر از ۰/۱ گردد.

بر طبق نتایج و وزن‌های محاسبه‌شده برای لایه‌ها، مناطق با بیش‌ترین بارش و کمترین دما دارای بیشترین وزن و اهمیت می‌باشند (شکل‌های ۳ و ۴).

مناطق با شیب کم، بافت خاک شنی رسی لومی، دارای

Priorities with respect to:
Goal: Groundwater
>climate
>Rain



شکل ۳- وزن‌های محاسبه‌شده برای مقادیر مختلف بارش

Figure 3- Calculated weights for different amounts of precipitation

Priorities with respect to:
Goal: Groundwater
>geology
>Slope



شکل ۵- وزن‌های محاسبه‌شده برای مقادیر مختلف شیب

Figure 5- Calculated weights for different values of slope

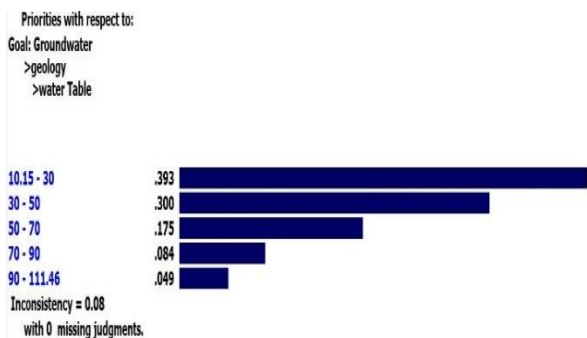
Priorities with respect to:
Goal: Groundwater
>geology
>NDVI



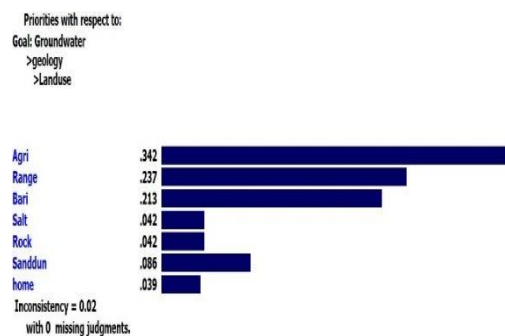
شکل ۷- وزن‌های محاسبه‌شده برای شاخص تفاضل

پوشش گیاهی استاندارد (NDVI)

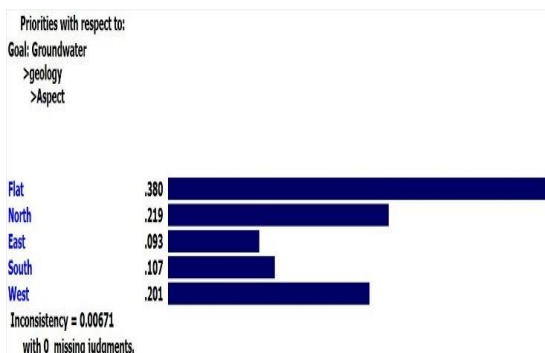
Figure 7- Calculated weights for NDVI



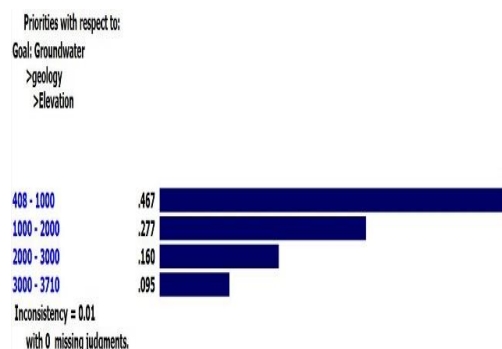
شکل ۱۰- وزن‌های محاسبه‌شده برای سطح آب زیرزمینی
Figure 10- Calculated weights for the underground water level



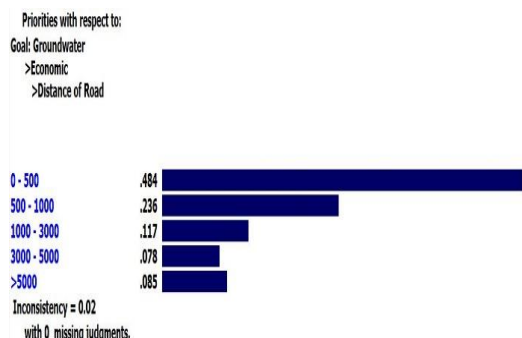
شکل ۹- وزن‌های محاسبه‌شده برای کاربری اراضی
Figure 9- Calculated weights for land use



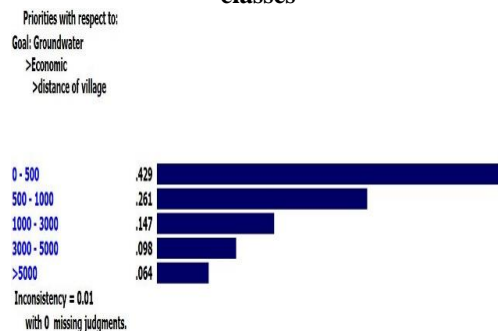
شکل ۱۲- وزن‌های محاسبه‌شده برای جهت جغرافیایی
Figure 12- Calculated weights for aspect



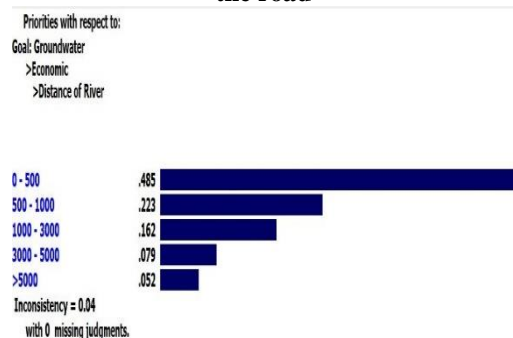
شکل ۱۱- وزن‌های محاسبه‌شده برای طبقات ارتفاعی
Figure 11- Calculated weights for elevation classes



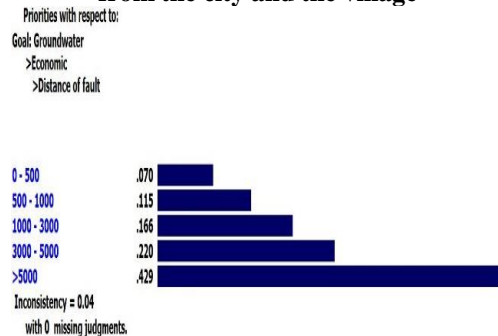
شکل ۱۴- وزن‌های محاسبه‌شده برای فاصله از جاده
Figure 14- Calculated weights for the distance from the road



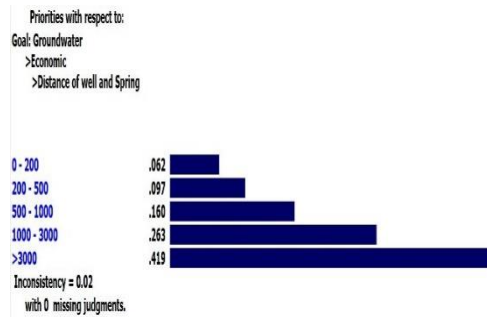
شکل ۱۳- وزن‌های محاسبه‌شده برای فاصله از شهر و روستا
Figure 13- Calculated weights for the distance from the city and the village



شکل ۱۶- وزن‌های محاسبه‌شده برای فاصله از رودخانه
Figure 16- Weights calculated for the distance from the river



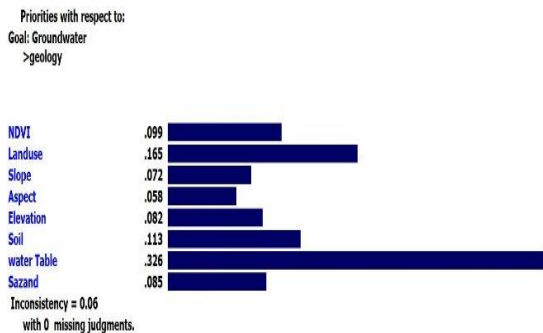
شکل ۱۵- وزن‌های محاسبه‌شده برای فاصله از گسل
Figure 15- Calculated weights for the distance from the fault



شکل ۱۷- وزن‌های محاسبه‌شده برای فاصله از چاه و چشمه

Figure 17- Weights calculated for the distance from wells and springs

آب زیرزمینی به روش تحلیل سلسله مراتبی است (شکل ۱۸). از بین عوامل زمین‌شناسی، عامل سطح آب زیرزمینی (۰/۳۲۶) و از بین عوامل اقلیمی، عامل بارش (۰/۸) دارای بیشترین وزن و اهمیت می‌باشند (شکل-های ۱۹ و ۲۰). به‌طور کلی عامل زمین‌شناسی، از بین عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و اقتصادی دارای بیش‌ترین وزن و اهمیت (۰/۶۱۴) در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی است (شکل ۲۱).

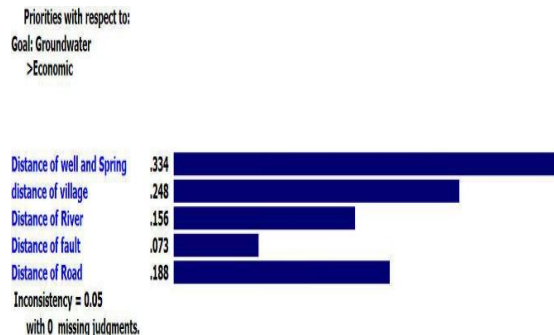


شکل ۱۹- وزن‌های محاسبه‌شده برای عوامل زمین‌شناسی

Figure 19- Calculated weights for geological factors

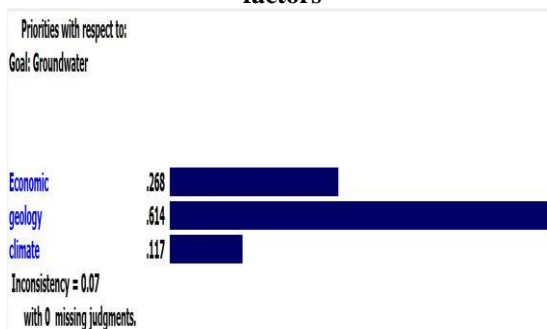
وزن‌های برون لایه‌ای

پس از وارد کردن مقایسه‌های زوجی برای عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در نرم‌افزار Expert Choice، وزن هر یک از لایه‌ها محاسبه گردید که نتایج آن در شکل‌های (۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱) ارائه شده است. بر طبق نتایج و وزن‌های محاسبه شد. برای عوامل اقتصادی، عامل فاصله از چاه و چشمه دارای بیش‌ترین وزن و اهمیت (۰/۳۳۴) در ارزیابی و پتانسیل‌یابی منابع



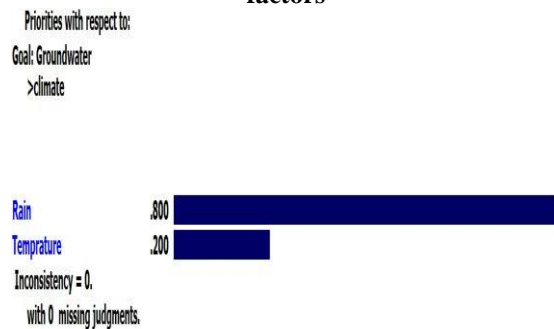
شکل ۱۸- وزن‌های محاسبه‌شده برای عوامل اقتصادی

Figure 18- Calculated weights for economic factors



شکل ۲۱- وزن‌های محاسبه‌شده برای منابع آب زیرزمینی

Figure 21- Calculated weights for ground water



شکل ۲۰- وزن‌های محاسبه‌شده برای عوامل اقلیمی

Figure 20- Calculated weights for climatic factors

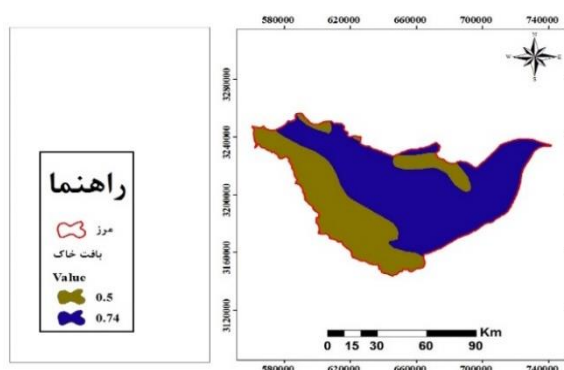
از گسل کم‌ترین وزن ۰/۰۲ را به خود اختصاص داده-
اند.

وزن نهایی لایه‌ها
همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد، مناطق
با تراز آب زیرزمینی با بیش‌ترین وزن ۰/۲۰ و فاصله

جدول ۳- نتایج وزن نهایی برای اجزاء هر یک از لایه‌ها

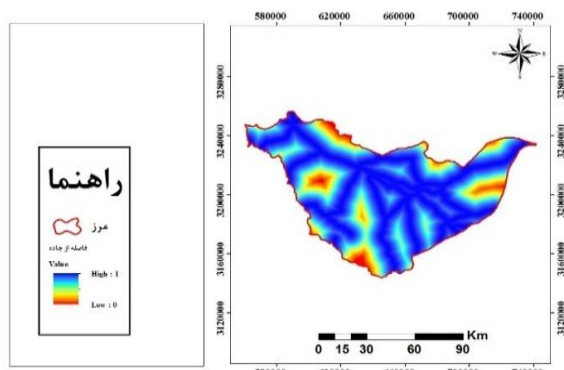
Table 3- The final weight for the components of each layer

وزن نهایی	وزن درون لایه	لایه	عامل	وزن نهایی	وزن درون لایه	لایه	عامل
0.094	0.8	بارش	اقلیم	0.05	0.188	فاصله از جاده	اقتصادی
				0.02	0.073	فاصله از گسل	
				0.042	0.156	فاصله از رودخانه	
0.023	0.2	دما		0.066	0.248	فاصله از روستا	
				0.09	0.334	فاصله از چاه و چشمه	
1	مجموع			0.061	0.099	NDVI	زمین‌شناسی
				0.101	0.165	کاربری اراضی	
				0.036	0.058	جهت	
				0.044	0.072	شیب به درصد	
				0.069	0.113	بافت خاک	
				0.05	0.082	طبقات ارتفاعی	
0.2		حداکثر	0.052	0.085	قابلیت نفوذپذیری		
0.02		حداقل	0.2	0.326	تراز آب زیرزمینی		



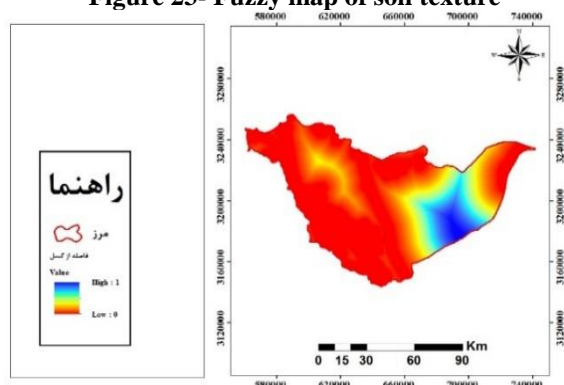
شکل ۲۳- نقشه فازی معیار خاک

Figure 23- Fuzzy map of soil texture



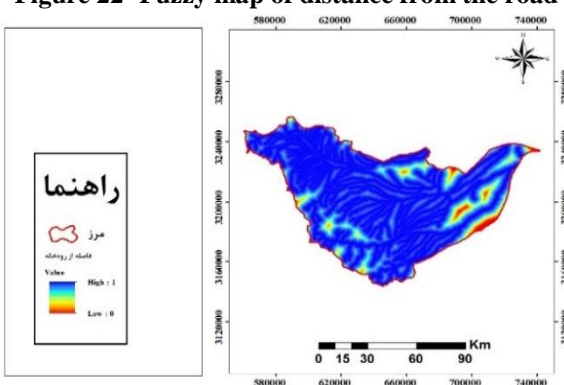
شکل ۲۲- نقشه فازی معیار فاصله از جاده

Figure 22- Fuzzy map of distance from the road



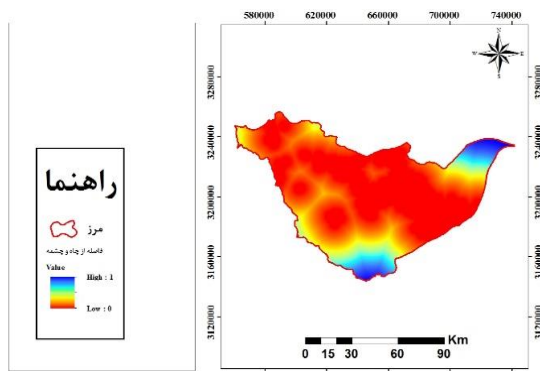
شکل ۲۵- نقشه فازی معیار فاصله از گسل

Figure 25- Fuzzy map of the criterion of the distance from the fault

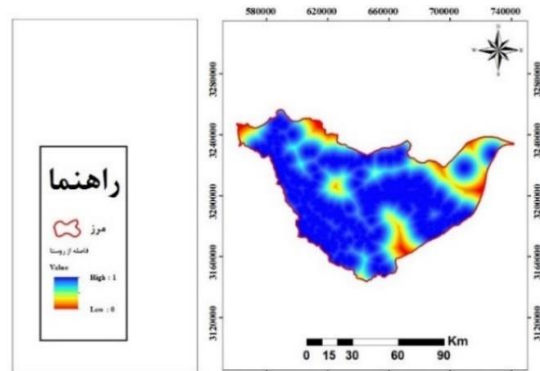


شکل ۲۴- نقشه فازی معیار فاصله از رودخانه

Figure 24- Fuzzy map of the criteria of distance from the river



شکل ۲۷- نقشه فازی معیار فاصله از چاه و چشمه
Figure 27- Fuzzy map of the criterion of the distance from the well and the spring



شکل ۲۶- نقشه فازی معیار فاصله از روستا
Figure 26- Fuzzy map of the criterion of distance from the village

نسبت به شهر و روستا، جاده و رودخانه و فاصله زیاد نسبت به گسل و چاه‌ها است.

ارزیابی دقت روش سلسله مراتبی-فازی (Fuzzy-AHP)

نتایج پیش‌بینی روش سلسله مراتبی-فازی در شکل (۲۹) با استفاده از منحنی ROC منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس این منحنی مشخص می‌شود که مکان‌یابی مناطق مستعد جهت ارزیابی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از این روش تحلیل سلسله مراتبی-فازی به میزان ۰/۷۹ است که حاکی از دقت مناسب این مدل است.

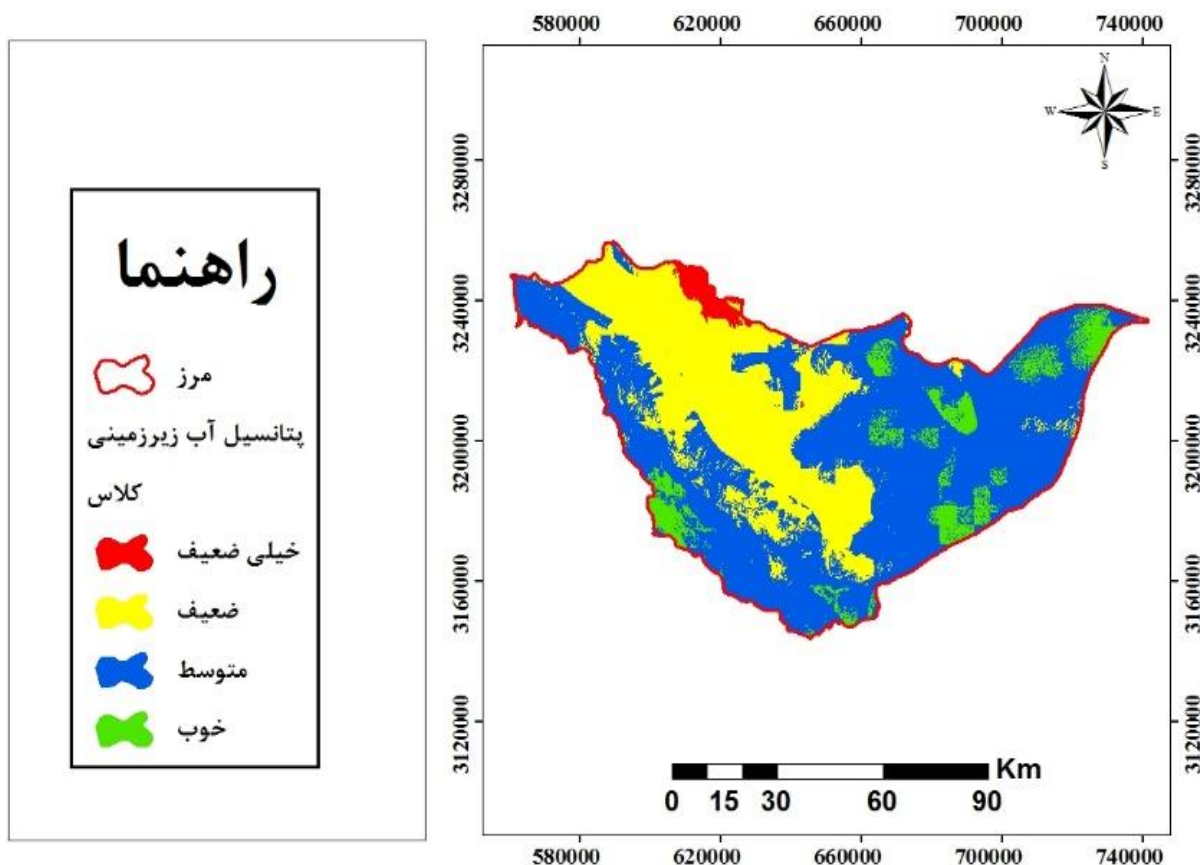
نتایج اولویت‌بندی پتانسیل‌یابی مناطق مستعد آب زیرزمینی

در نهایت با استفاده از روش سلسله مراتبی-فازی (Fuzzy-AHP) و بر اساس میانگین نظرات کارشناسی، به ارزیابی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در دشت بم-نرماشیر پرداخته شد. منطبق بر نتایج به دست آمده در حدود ۷/۷۷ درصد از این دشت، دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی در کلاس خوب است (جدول ۴ و شکل ۲۸). علت پتانسیل بالای آب زیرزمینی این مناطق، شیب کم، سازند زمین‌شناسی با نفوذپذیری بالا، سطح آب زیرزمینی بالا، ارتفاع کم، فاصله کم

جدول ۴- مساحت طبقات با پتانسیل متفاوت منابع آب زیرزمینی در دشت بم- نرماشیر

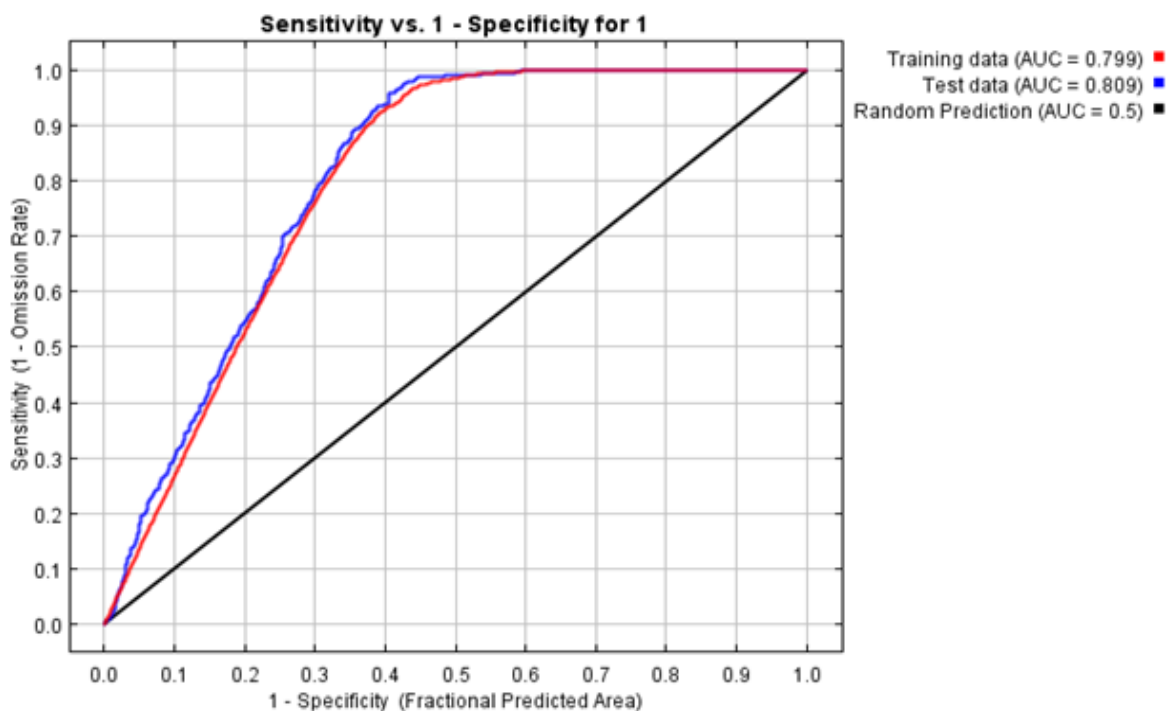
Table 4- The area of different potential classes of groundwater resources in Bam-Narmashir plain

کلاس	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)
خیلی ضعیف	153.68	1.57
ضعیف	3073.74	31.71
متوسط	5713.79	58.98
خوب	755.54	7.77



شکل ۲۸- نقشه ارزیابی و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی بر اساس روش F-AHP در دشت بم-نرماشیر

Figure 28- Map of assessment and potential of underground water resources based on F-AHP method in Bam-Narmashir plain



شکل ۲۹- منحنی ROC دشت بم-نرماشیر

Figure 29- ROC curve of Bam-Narmashir plain

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش از پارامترهای بارندگی، دما، فاصله از جاده، کاربری اراضی، جهت جغرافیایی، شیب، پوشش گیاهی، فاصله از رودخانه، فاصله از غسل، فاصله از شهر و روستا، فاصله از چاه و چشمه، بافت خاک و قابلیت نفوذپذیری سازند به‌عنوان معیارهای تأثیرگذار در امر تصمیم‌گیری استفاده و ابتدا مقادیر بارندگی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در سطح دشت، درون‌یابی و پهنه‌بندی شد. محاسبه وزن اهمیت نسبی لایه‌ها با استفاده از روش AHP و نرم‌افزار Expert choice 11 انجام گردید، این لایه‌ها پس از تأثیر وزن‌ها با روش فازی با هم ترکیب‌شده و لایه نهایی مناطق مستعد پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شد. پس از طبقه‌بندی این لایه در چهار کلاس خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط و خوب قرار گرفت که دو کلاس خوب و متوسط نواحی جنوب دشت را در بر گرفته ولی رفته‌رفته از جنوب به شمال دشت از مناطق مستعد با پتانسیل آب زیرزمینی کاسته شده، به‌طوری‌که نواحی شمالی دشت در کلاس خیلی ضعیف و ضعیف واقع شده‌اند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت قسمت‌های مختلف دشت برای پتانسیل آب زیرزمینی دارای تناسب یکسانی نمی‌باشند. نتایج حاصل از تهیه نقشه مناطق مستعد پتانسیل آب زیرزمینی، نشان‌دهنده تفاوت توزیع عرصه‌های مناسب پتانسیل آب زیرزمینی در دشت بم-نرماشیر است که با نتایج Sekar & Randhir (۲۰۰۷) که بیان داشتند پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی در سطح حوزه آبخیز، دارای توزیع مکانی یکنواخت نمی‌باشد، همسو است. نتایج نشان داد که در قسمت شمال و غرب دشت که عمدتاً خاک ظرفیت پایینی برای پتانسیل آب زیرزمینی و نفوذ آب دارد که با نتایج Akbarpoor و همکاران (۲۰۱۶) که بیان داشتند در قسمت‌های غرب و شمال غرب حوزه آبخیز بیرجند به

دلیل صخره‌ای بودن و عمق کم خاک و شیب زیاد بوده خاک ظرفیت پایینی برای نفوذ آب دارد، مطابقت دارد. نتایج نشان داد که حدود ۷/۷۷ درصد از مساحت کل دشت معادل ۷۵۵/۵۴ کیلومترمربع دارای پتانسیل خوب آب زیرزمینی است. البته این امر قطعی نیست و عدم قطعیت‌هایی همواره در بررسی شرایط محیطی، انتخاب معیارها، جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات و در روش‌ها و تکنیک‌ها و فرآیند تحلیل وجود دارد؛ بنابراین بخش وسیعی از منطقه دارای وابستگی به منابع آب زیرزمینی خواهد بود. هم‌چنین ۱/۵۷، ۳۱/۷۱ و ۵۸/۹۸ درصد از اراضی دشت به ترتیب دارای استعداد خیلی ضعیف، ضعیف و متوسط برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی می‌باشند. هم‌چنین، بررسی وزن معیارها بر اساس روش سلسله مراتبی بیانگر آن است که بارندگی، فاصله از چاه و چشمه، کاربری اراضی و تراز آب زیرزمینی به‌عنوان تأثیرگذارترین معیارها در شناسایی مناطق مستعد پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشند به‌طوری‌که پارامتر تراز آب زیرزمینی و بارش از مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار بر تعیین مکان مناسب پتانسیل آب زیرزمینی است که در این پژوهش جز پارامترهای مهم معرفی شده است؛ که با نتایج Adiat و همکاران (۲۰۱۲)، مطابقت دارد. درنهایت برای اعتبارسنجی نقشه پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی در منطقه از منحنی ROC استفاده شد که نتیجه این منحنی نیز، حاکی از دقت زیاد این روش در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی است. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌گرانی چون Rezaei Moghaddam و همکاران (۲۰۱۷) و Faraji Sabokbar و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد. استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی-فازی در مطالعات صورت گرفته، نشان می‌دهد مدل مذکور روشی انعطاف‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه است و

باشد. باوجوداینکه شناسایی دقیق مکان‌های مناسب پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی بسیار سخت و پیچیده است؛ این مطالعه نشان داد که استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، شناسایی این مکان‌های مناسب را با کم‌ترین امکانات امکان‌پذیر می‌کند که با یافته‌های Kheirkhah و همکاران (۲۰۱۴) هم‌خوانی دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق و با توجه به خشک بودن منطقه مورد مطالعه و فشار بیش‌ازحد بر روی منابع آب زیرزمینی این دشت، سناریوهای کاهش برداشت و راهکارهای لازم از قبیل تدابیری جهت اصلاح نظام آبیاری، روش‌هایی به‌منظور کاهش تبخیر و اصلاح نظام کشت و استحصال آب باران در این منطقه توصیه می‌گردد. هم‌چنین از آنجایی که روش تحلیل سلسله مراتبی کاملاً منطبق بر نظرات کارشناسی است، لذا پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آتی از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره دیگری نظیر تاپسیس، ویکور و... در دشت بم-نرماشیر استفاده گردد.

ابزاری به‌منظور معرفی، انتخاب و وزن دهی شاخص‌ها در مطالعات مختلف به‌منظور بررسی‌های بیشتر محسوب می‌شود و در مقابل تصمیمات مدیریتی پیچیده کارآمد و مفید است. در تأیید این مطلب Kheirkhah و همکاران (۲۰۱۷) نیز در تحقیقی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مکان‌یابی مناطق مناسب احداث سد زیرزمینی در منطقه نطنز استفاده نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسید که به‌کارگیری سامانه تصمیم‌گیری موجب تسهیل، کاهش هزینه و زمان و افزایش دقت در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی شده است. هم‌چنین سامانه اطلاعات جغرافیایی یکی از ابزارهای مناسب و کارآمد در جهت ذخیره‌سازی، به‌روزرسانی، بازیافت و تحلیل اطلاعات متنوع است که در دهه‌های اخیر اهمیت بیشتری پیدا کرده است. در سال‌های اخیر استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ترکیب آن با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و فازی جهت به دست آوردن نتایج دقیق‌تر افزایش روزافزونی داشته و باعث شده تا نقش کلیدی در مطالعات پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی داشته

References

- Abrishamchi, A., Fard, F. K. & Taghavi, A. (2020). Planning for groundwater sustainable use: A case study in Nishapur Plain, Iran. *Agricultural Water Management*, 229, 105835.
- Adiat, K. A. N., Nawawi, M. N. M. & Abdullah, K. (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.
- Akbarpoor, A., Khashei Siuki, A., Keshavarz, A. & Forooghifar, H. (2016). Determination of the Appropriate Sites to Rain Water Harvesting using Analysis Hierarchical Process (AHP). *Journal of Watershed Management Research*. 6 (12), 65-74. (In Persian).
- Akobeng, A. K. (2007). Understanding diagnostic tests 3: receiver operating characteristic curves. *Acta paediatrica*, 96(5), 644-647.
- Baharvand, S., Amiri Amraei, V. & Soori, S. (2020). Potential of Groundwater Resources Using Remote Sensing Methods, Geographic Information System and Fuzzy Hierarchy Case study: Khorramabad catchment area, *Journal of Geography and Development*. 60, 181-200. (In Persian)
- Castillo, J. L., Martínez Cruz, D. A., Ramos Leal, J. A., Tuxpan Vargas, J., Rodríguez Tapia, S. A. & Marín Celestino, A. E. (2022). Delineation of groundwater

- potential zones (GWPZs) in a semi-arid basin through remote sensing, GIS, and AHP approaches. *Water*, 14(13), 2138.
- 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*, 1-22.
- Chung, C. J. F. & Fabbri, A. G. (1993). The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*, 2(2), 122-139.
- Dixon, B. (2005). Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, 25(4), 327-347.
- Duan, H., Deng, Z., Deng, F. & Wang, D. (2016). Assessment of groundwater potential based on multicriteria decision making model and decision tree algorithms. *Mathematical Problems in Engineering*. vol. 2016, Article ID 2064575. doi.org/10.1155/2016/2064575.
- Eskandari, M., Homaei, M. & Mahmodi, S. (2012). An integrated multi criteria approach for landfill siting in a conflicting environmental, economical and socio-cultural area. *Waste management*, 32(8), 1528-1538.
- Faraji Sabokbar, H. A., Nasiri, H., Hamze, M., Talebi, S. & Rafiei, Y. (2012). Identification of suitable areas for artificial groundwater recharge using integrated ANP and pair wise comparison methods in GIS environment, (Case study: Garbaygan Plain of Fasa). *Geography and Environmental Planning*. 22(4), 143-166. (In Persian)
- Hashemi, M., Ghorbani, R. & Kavehai, B. (2004). ROC analysis for comparing medical diagnosis tests. *Scientific Journal of Semnan University of Medical Sciences*, 6(2), 145-150.
- Jasmin, I. & Mallikarjuna, P. (2011). Satellite-based remote sensing and geographic information systems and their application in the assessment of groundwater potential, with particular reference to India. *Hydrogeology Journal*, 19(4), 729-740.
- Jha, M. K., Kamii, Y. & Chikamori, K. (2009). Cost-effective approaches for sustainable groundwater management in alluvial aquifer systems. *Water resources management*, 23(2), 219.
- Kasiri, Z., Habibnejad, M. & Roshan, S. (2020). Finding the potential of underground water resources based on geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) using network analysis process (ANP) research sample: Naz Plain in Sari, *Geography and environmental planning*. 31(1), 103-120. (In Persian)
- Kheirkhah, M., Naseri H. R., Dawoodi M. H. & Salami, H. (2017). Using Hierarchical Analysis Method for prioritizing suitable places for construction of underground Dam (Case Study: Northern Domain of Karkas-Natanz Mountains). *Journal of research and construction*. 79(1), 1-12. (In Persian)
- Kheirkhah, M., Mohebi Tafreshi, GH, Majidi, A. & Asadian, F. (2014). Using Integration GIS and Remote Sensing Techniques by Decision Support System to Locate Suitable Areas construction of Underground Dam (The Case Study of Qazvin province). *Iranian Journal of Watershed Management Science*. 8 (26), 35-50. (In Persian).
- Kumar, R. & Indrayan, A. (2011). Receiver operating characteristic (ROC) curve for medical researchers. *Indian pediatrics*, 48(4), 277-287.
- Mahmudian, M. (2013). Groundwater hydraulics, Publications of Shahid Chamran University of Ahvaz. 2, 574. (In Persian)
- Minh, H. V. T., Avtar, R., Kumar, P., Tran, D. Q., Ty, T. V., Behera, H. C. & Kurasaki, M. (2019). Groundwater Quality Assessment Using Fuzzy-AHP

- in a Giang Province of Vietnam. *Geosciences*, 9(8), 330.
- Monavari, M. M., Hassani, M., Farshchi, A. H. P. & Rossta, Z. (2012). Environmental effects of artificial recharge of aquifers in Yazd (Case Study: Yazd-Ardekan plain drainage basins). *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 14(2), 27-36.
- Murmu, P., Kumar, M., Lal, D., Sonker, I. & Singh, S. K. (2019). Delineation of groundwater potential zones using geospatial techniques and analytical hierarchy process in Dumka district, Jharkhand, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100239.
- Musavi, S. J., Chitsazan, M, Mirzayi, Y. & Shaban, M. (2003). Integration of remote sensing and GIS for finding the potential of suitable areas for groundwater feeding (Case study: Kamestan anticline area), First National Conference on Geomatic, Tehran, April 21 (In Persian)
- Oh, H. J., Kim, Y. S., Choi, J. K., 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.
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M. V. & Singh, V. S. (2008). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental geology*, 55(3), 467-475.
- Rahaman, M. H., Sajjad, H., Masroor, M., Bhuyan, N. & Rehman, S. (2022). Delineating groundwater potential zones using geospatial techniques and fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) ensemble in the data-scarce region: evidence from the lower Thoubal river watershed of Manipur, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(8), 677.
- Rezaei Moghaddam, M. H., Rahimpour, T. & Nakhostinrouhi, M. (2017). Potential Detection of the Groundwater Resources Using Analytic Network Process in Geographic Information System (Case Study: Basins Leading to Tabriz Plain). *Iranian Journal of Eco Hydrology*. 3(3), 379-389. (In Persian).
- Rezayi, M, Tahtani, M, Moghadamnia, A. & Abkar, A. (2013). Investigating the effectiveness of the statistical exponential microscale model in predicting precipitation in two arid and ultra-arid climates. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 28(4), 836-845. (In Persian)
- Sadeghi, B. & Khalajmasoumi, M. (2015). A futuristic review for evaluation of geothermal potentials using fuzzy logic and binary index overlay in GIS environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 818-831.
- Sekar, I. & Randhir, T. O. (2007). Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology*, 334(1-2), 39-52.
- Shahbazi, E., Tahmasbipour, N., Zainiwand, H. & Haqizadeh, A. (2013). *Finding the potential of groundwater resources using the frequency ratio (RF) model*. First National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, Tehran, Iran. January 1. (In Persian)
- Soltani, A. (2017). Feasibility of areas prone to rainwater harvesting using hierarchical analysis in GIS environment (Case study: Khosroabad watershed, Sanghar city), *Rain catchment surface systems*. 5(2), 65-76.
- Soori, S., Baharvand, S. & Amiri, V. (2017). Delineation of groundwater potential using AHP-Fuzzy (A Case Study: Romeshgan plain). *Scientific Research Journal of Environmental Geology*, 11(40), 11-26. (In Persian)
- Testa, S., Soudani, K., Boschetti, L. & Mondino, E. B. (2018). MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International journal*

of applied earth observation and geoinformation, 64, 132-144.

Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, (1), 28-44.