

Groundwater Resources Potential Based on Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) Using Analytic Network Process (ANP) (Case Study: Naz Sari Plain)

Zahra Kasiri¹, Mahmoud Habibnejad Roshan*², Sayed Hussein Roshun³

1- MSc. Graduate in Water Engineering, Haraz Institute of Higher Education, Amol, Iran

2- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(*Corresponding Author Email: m.habibnejad@sanru.ac.ir)

3- Ph.D. Candidate, Department of Watershed Management Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

1. Introduction

Groundwater resources are considered as one of the most important sources of freshwater in the world, which provides an important part of the needs of industry, agriculture, and drinking. Due to the location of Iran in the semi-arid and arid climate of the world, studies on the conservation of water resources are becoming increasingly clear. It is necessary to plan and manage the optimal water resources (surface and subsurface) of their study and exploration, which is possible through academic research. The zoning of underground water potential has become an important issue in the world today, with a lot of research being done on this issue. This issue is now facilitated by the use of new technologies of geographic information systems and remote sensing by combining decision-making models. The purpose of this research is to integrate GIS and remote sensing with decision-making models in order to map the potential of groundwater resources in one of the country's most important plains. Such research is necessary in view of the farming industry, gardens, and industrial use of groundwater in the area.

2. Methodology

In order to provide the potential groundwater resources map, 13 factors influencing water permeability in the soil and its storage were considered including geological layers, vegetation, slope, slope direction, rainfall, temperature, elevation, distance from the fault, fault density, distance from the waterways and the congestion, and the distance from the road. These layers were prepared in ArcGIS and Envi software. Then, based on the ANP method, each of the factors was multiplied by its weight vector, and finally, by combining the layers, a groundwater potential mapping map was obtained for the area. In order to assess the accuracy and validation of the final map, the statistics of fountains, qanats, and wells in the area, as well as the ROC curve method, were used.

3. Discussion

The groundwater potential mapping potential in the study area was obtained based on the combination of GIS, remote sensing technology, and network analysis methodology, which indicates that about 955.35 sq. Km of the potential area is 2549.76 square kilometers of potentials and very small and 642.16 square kilometers have a moderate potential. High potential areas are more consistent with low altitudes due to lower slopes, alluvial terraces, conifers, and plain areas, where more surface water penetration is possible. Areas with low and very low potentials, which are very steep. Also, according to the ROC curve, the 87 percent result of this curve also indicates the high accuracy of the Antenna Process Analysis (ANP) method for the preparation of groundwater potential maps in the study area.

4. Conclusion

Application of ANP model in water resources planning in catchment areas, considering flexibility, taking into account feedback and relation between criteria, using quantitative and qualitative criteria simultaneously and the ability to review compatibility in judgments in order to study the issues related



جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۱، پیاپی ۷۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹

نوع مقاله: پژوهشی

وصول: ۱۳۹۸/۱۰/۲ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۱۵

صص ۱۲۰-۱۰۳

پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) نمونه پژوهش: دشت ناز ساری

زهرا کسیری، کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده علوم محیطی، مؤسسه آموزش عالی هراز آمل، آمل، ایران

z.kasiry@gmail.com

محمود حبیب‌نژاد^{*}، استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

m.habibnejad@sanru.ac.ir

سید حسین روشن، دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

h.roshun2011@gmail.com

چکیده

شناسایی منابع آب زیرزمینی و تلاش برای حفظ منابع آبی، یکی از اهداف بزرگ کشورهایی است که با مشکل کم‌آبی مواجه هستند. آب‌های زیرزمینی طی دهه‌های اخیر به دلیل برداشت بیش از تغذیه کاهش یافته‌اند. مدیریت منابع آب زیرزمینی با اکتشاف و بهره‌برداری متناسب با پتانسیل آبخوان، یکی از مهم‌ترین راهبردها در این زمینه است. در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی دشت ناز ساری، از عوامل مؤثر بر نفوذپذیری خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شامل لایه‌های زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، شیب، جهت شیب، بارش، دما، ارتفاع، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه و فاصله از جاده استفاده شد. به این منظور نخست لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.3 به صورت لایه رستری تهیه شد؛ سپس هریک از عوامل در بردار وزن به دست آمده از روش ANP ضرب و نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی منطقه از راه حاصل جمع لایه‌های نهایی عوامل اقلیمی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، توپولوژی و زیست‌محیطی تهیه شد. به منظور اعتبارسنجی نقشه نهایی، منحنی ROC به کار رفت.

نتایج نشان داد ۹۹۵/۳۵ کیلومتر مربع از مساحت منطقه پتانسیل زیاد و بسیار زیاد، ۲۵۴۹/۷۶ کیلومتر مربع پتانسیل کم و بسیار کم و ۶۴۲/۱۷ کیلومتر مربع پتانسیل متوسط در زمینه منابع آب زیرزمینی دارند؛ همچنین نتیجه ۸۷ درصدی منحنی ROC بیان‌کننده دقت زیاد این روش در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی است. براساس روش ANP نیز، عوامل زمین‌شناسی و ارتفاع منطقه بیشترین تأثیر را بر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در منطقه بررسی شده دارند. بر این مبنای بررسی پتانسیل سفره‌های آب زیرزمینی و بهره‌برداری بهینه و متناسب با توان آبخوان برای مدیریت پایدار این منابع ضروری است.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل یابی، آبخوان، ANP، منحنی ROC، حوضه آبخیز تجن

*نویسنده مسئول

Copyright©2017, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

[Doi:10.22108/gep.2020.118887.1197](https://doi.org/10.22108/gep.2020.118887.1197)

مقدمه

منابع آب زیرزمینی، مهم‌ترین منابع آبی پایدار و قابل اتکا در سراسر جهان به شمار می‌روند (Singh et al., 2018: 1). افزایش بی‌رویه جمعیت، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آب‌های زیرزمینی سبب وارد شدن خسارات جبران‌ناپذیر به منابع طبیعی کشور در سال‌های گذشته شده است. آب‌های زیرزمینی در کشور به‌مثابه یکی از منابع مهم تأمین آب مورد نیاز در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت اهمیت زیادی دارد. آب‌های زیرزمینی از یک سو به دلیل شیرین بودن، ترکیبات ثابت شیمیایی، دمای ثابت، ضریب آلودگی کمتر و سطح اطمینان بیشتر، یک منبع قابل اتکا به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود و از سوی دیگر، با تأثیر بر توان اکولوژیک سرزمین، پدیده‌ای مهم و مؤثر در توسعه اقتصادی، تنوع اکولوژیکی و سلامت جامعه به شمار می‌آید (Jha et al., 2009: 220).

آب‌های زیرزمینی فقط حدود ۴ درصد از مجموعه آب‌هایی را تشکیل می‌دهد که فعالانه در سیکل هیدرولوژی دخالت دارند؛ با وجود این، حدود ۵۰ درصد جمعیت دنیا از نظر آب شرب به همین آب‌ها متکی‌اند. این رقم در ایران به مراتب بیشتر از ۵۰ درصد است و بیشتر شهرها و روستاهای کشور آب مورد نیاز شرب و کشاورزی خود را از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌کنند (علیزاده، ۱۳۹۴: ۲۴). کشور ایران با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و میانگین بارش سالانه ۲۵۰ میلی‌متر از کم‌آب‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌شود (هاتف و همکاران، ۱۳۹۵: ۶۲). این گستره بزرگ جغرافیایی با مشخصات هیدرولوژیکی خاص نظیر حجم نزولات ۴۱۳، تبخیر و تعرق ۲۹۶، حجم آب در دسترس ۱۱۷ میلیارد مترمکعب، سرانه آب تجدیدشونده ۱۹۰۰ و مصرف ۳/۴ میلیارد مترمکعب که حدود ۶۵ درصد آن از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود، با شرایط سختی در زمینه تأمین آب روبه‌روست (علیزاده، ۱۳۹۴: ۳۳). با توجه به مشخصات هیدرولوژیکی کشور، بازنگری در مدیریت و راهبرد منابع آب در برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور، امری اجتناب‌ناپذیر و جدی است (رحیمی و موسوی، ۱۳۹۱: ۱۵۶). برای رسیدن به مدیریت مناسب، نخست باید ظرفیت منابع آب‌های موجود سطحی و زیرزمینی را به‌خوبی شناسایی و مطالعه کرد تا برنامه‌ریزی جامعی برای بهره‌برداری درست از آنها انجام شود.

علاوه بر لزوم اشاعه رویه‌های مرسوم و مطلوب در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، فناوری‌های جدید مانند مدل‌سازی در سیستم اطلاعات جغرافیایی و پردازش داده‌های ماهواره‌ای با توجه به ویژگی‌هایی مانند سرعت و دقت زیاد و دید وسیع و یکپارچه، ابزاری مناسب برای اکتشاف منابع آبی با توجه به هزینه‌های زیاد روش‌های سنتی محسوب می‌شوند (مفیدی‌فر و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۴۷؛ Chowdhury et al., 2010: 1209؛ Meshram et al., 2010: 32). به علت وجود عوامل متعدد دخیل در امر پتانسیل‌یابی و نیاز به بررسی توأم معیارهای ارزیابی شده (در قالب نقشه)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، ابزاری کارآمد برای پردازش داده‌های مکانی مختلف است. پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی برپایه سیستم اطلاعات جغرافیایی به همراه سنجش از دور، ابزاری مؤثر محسوب می‌شود (Adeyeye et al., 2019: 175). در دهه اخیر، استفاده گسترده از تصاویر ماهواره‌ای در کنار نقشه‌های موضوعی و داده‌های زمینی، روند آسان‌تری را برای مطالعه پتانسیل آب‌های زیرزمینی فراهم کرده است (رحیمی و سلیمانی، ۱۳۹۵: ۲۷؛ Murasingh et al., 2018: 387).

امروزه تلفیق فناوری‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی با مدل‌های تصمیم‌گیری در پژوهش‌های

مدیریتی و هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز کاربرد فراوان دارد و به ابزاری برای اکتشاف منابع آب زیرزمینی تبدیل شده است که به ما در زمینه ارزیابی منابع آب زیرزمینی، نظارت بر این منابع و حفاظت از آنها کمک می‌کند (Patra et al., 2018: 2485; Magesh et al., 2012: 189; Dar et al., 2010: 285; فتحی‌زاد و همکاران، ۱۳۹۵: ۱). از جمله مدل‌های تصمیم‌گیری، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل شبکه‌ای (ANP) است (Etitshree et al., 2013: 887; Gorener, 2012: 194).

پیشینه پژوهش

به تازگی پژوهش‌های زیادی درباره پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در دنیا انجام شده است. بیشتر این پژوهش‌ها حاصل ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و مدل‌های تصمیم‌گیری هستند، اما از نظر روش‌شناسی و فرایند انجام کار با هم متفاوت‌اند. در زیر به چند نمونه از آنها اشاره می‌شود.

عباسی و حیدری (۱۳۹۵) برای بررسی پتانسیل آب زیرزمینی حوضه شمالی استان ایلام از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و منطق فازی استفاده کردند. معیارهای لیتولوژی، تراکم زهکشی، تغییرات شیب، کاربری اراضی، توپوگرافی، جمعیت، چشمه، چاه، گسل و شکستگی برای ورود به مدل انتخاب شدند و پس از نظرسنجی و مقایسه دوبه‌دو بین معیارها، وزن معیارها به دست آمد. نقشه نهایی حاصل از روش AHP نشان می‌دهد بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی در بخش‌های آهکی با تراکم زیاد شکستگی وجود دارد.

فلاح و همکاران (۱۳۹۶) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی را با استفاده از روش شاخص آماری در محدوده شهر خرم‌آباد مدنظر قرار دادند. آنها لایه‌های رقومی متغیرهای مؤثر بر پتانسیل آب‌های زیرزمینی را در محیط ArcGIS تهیه کردند؛ سپس با استفاده از روش هم‌پوشانی وزنی، نقشه نهایی پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی را در محدوده پژوهشی تهیه کردند. در نهایت برای تعیین صحت نقشه نهایی از منحنی ROC استفاده کردند که میزان دقت نقشه نهایی براساس این منحنی، ۸۲ درصد بود. این امر نشان‌دهنده دقت زیاد این روش در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی است. فویه و همکاران^۱ (2016) در مدل‌سازی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی رودخانه هالوین^۲ در تایوان با استفاده از GIS، از عوامل محیطی مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی از جمله سنگ‌شناسی، شیب، خطواره، کاربری اراضی، خاک، بارندگی، تراکم زهکشی و ژئومورفولوژی استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد منطقه دره هاتونگ^۳ بیشترین پتانسیل شارژ آب زیرزمینی را دارد.

آکینلالو و همکاران^۴ (2017) آب زیرزمینی منطقه اوکه‌آنا^۵ در جنوب غربی نیجریه را با استفاده از سیستم GIS و سنجش از دور و روش آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی کردند. آنها از مقایسه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی مبتنی

¹. Yeh, H.F. et al.

². Hualian

³. Huatung

⁴. Akinlalu et al.

⁵. Oke-Ana

بر پارامترهای هیدرولوژیکی از جمله چگالی خطی، چگالی زهکشی، سنگ‌شناسی، ضخامت بیش از حد مقاومت آب و لایه آبخوان با نقشه پتانسیل آب زیرزمینی مبتنی بر پارامترهای زیرزمینی به این نتیجه رسیدند که منطقه از نظر پتانسیل آب زیرزمینی به سه قسمت دارای پتانسیل کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

روش پژوهش

در این پژوهش، نخست با توجه به تجزیه و تحلیل‌های انجام‌شده و بررسی منابع مختلف داخلی و خارجی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغذیه آبخوان و نگهداشت منابع آب زیرزمینی ارزیابی شد. در ادامه، ۱۳ متغیر از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی شامل لایه‌های زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، مقدار شیب، جهت شیب، بارش، دما، ارتفاع، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از جاده و تراکم جاده با توجه به تجربیات کارشناسان و پژوهشگران برای منطقه پژوهش در نظر گرفته شد. این عوامل از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، باندهای مرئی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی منطقه، موقعیت و آمار چشمه‌ها و قنوات و مختصات ۱۴۲ چاه پیژومتری و آمار تراز آب آنها که در منطقه بررسی شده قرار دارند، داده‌های شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان و سازمان هواشناسی استخراج و به‌مثابه ورودی تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای فرایند پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با بهره‌گیری از فرایند تحلیل شبکه‌ای استفاده شد. در نهایت با بهره‌گیری از منحنی ویژگی‌های عامل نسبی (ROC)، نقشه تهیه‌شده اعتبارسنجی شد.

تهیه لایه‌های اطلاعاتی

برای به‌دست‌آوردن لایه‌های مورد نیاز از نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزارهای ArcMap 10.3 و ENVI 5.0 استفاده شد که در زیر به آنها اشاره می‌شود.

نقشه کاربری و پوشش اراضی

وجود پوشش گیاهی در هر منطقه، سرعت جریان‌های سطحی را کاهش می‌دهد و سبب نفوذ بیشتر آب به داخل خاک و در نتیجه افزایش میزان آب‌های زیرزمینی می‌شود (صابری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۲). برای تفکیک مناطق دارای پوشش گیاهی و فاقد آن از باندهای مرئی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI در محیط نرم‌افزار ENVI 5.0 استفاده شد که به فرمت Shape file در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.3 ذخیره شد.

نقشه طبقات ارتفاع، مقدار و جهت شیب

طبقات ارتفاع، مقدار و جهت شیب از فاکتورهای مؤثر بر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی هستند که نقش مهمی در ضریب رواناب و نفوذپذیری دارند. این فاکتورها در شیب هیدرولیکی و جهت حرکت آب زیرزمینی و محل تشکیل آبخوان نقش مؤثری دارند (رحیمی و موسوی، ۱۳۹۱: ۱۴۵). به‌منظور تهیه نقشه‌های طبقات ارتفاعی، مقدار و جهت شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه استفاده و هر یک از نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.3 تهیه شد.

نقشه دما و بارش

برای تهیه لایه‌های دما و بارش از داده‌های دما و بارش ایستگاههای هواشناسی موجود در منطقه استفاده شد. به منظور تعمیم داده‌های نقطه‌ای ایستگاهها به داده‌های پهنه‌ای با استفاده از روش‌های درون‌یابی جبری و مدل^۱ LPI، به دلیل دقت بیشتر و خطای کمتر نسبت به دیگر روش‌های درون‌یابی، داده‌های مختص به دما و بارش درون‌یابی در محیط ArcMap 10.3 به نقشه تبدیل شد.

نقشه تراکم و فاصله از آبراهه

برای تهیه نقشه آبراهه‌های منطقه نیز از نقشه توپوگرافی منطقه استفاده شد. نقش عوامل هیدرولوژی به همراه پارامترهای اقلیمی شبیه بارش و مشخصات شبکه زهکشی مانند تراکم شبکه آبراهه به صورت غیرمستقیم نشان‌دهنده میزان نفوذپذیری است؛ به طوری که زیادبودن تراکم آبراهه نشان‌دهنده کاهش نفوذ و کم‌بودن آن به شرط مهیا بودن شرایط زمین‌شناسی، خاک و پوشش گیاهی نشان‌دهنده زیادبودن آن است (رحیمی و موسوی، ۱۳۹۱: ۱۴۵).

نقشه زمین‌شناسی، تراکم و فاصله از گسل

افزایش تراکم درزه و گسل‌ها به طور کلی اهمیت زیادی در نفوذ و انتقال آب زیرزمینی دارد و به این ترتیب برای استخراج، حفاظت آب و پراکندگی مواد آلاینده مهم است (Prasad et al., 2008: 468). نقشه‌های زمین‌شناسی و گسل منطقه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شد.

نقشه جاده‌ها و فاصله از آنها

جاده‌ها به مثابه سطوح نفوذناپذیر که بر تولید رواناب اثر زیادی دارند، بر میزان نفوذپذیری نیز مؤثرند. برای تهیه نقشه جاده‌های منطقه نیز از نقشه توپوگرافی منطقه به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ استفاده شد.

نقشه چشمه و قنات

موقعیت و آمار چشمه‌ها و قنات موجود در منطقه مدنظر از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران اخذ شد. برای تهیه نقشه موقعیت چشمه‌ها و قنات، آمار مختصات جغرافیایی از محیط Excel به محیط ArcMap 10.3 فراخوانده شد؛ سپس لایه هر کدام به صورت وکتور تهیه و به مثابه ورودی استفاده شد.

نقشه چاههای پیزومتری

مختصات ۱۴۲ چاه پیزومتری و آمار تراز آب آنها نیز از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران گرفته شد؛ سپس مختصات آنها به محیط نرم‌افزار ArcMap 10.3 فراخوانده و لایه مدنظر تهیه شد.

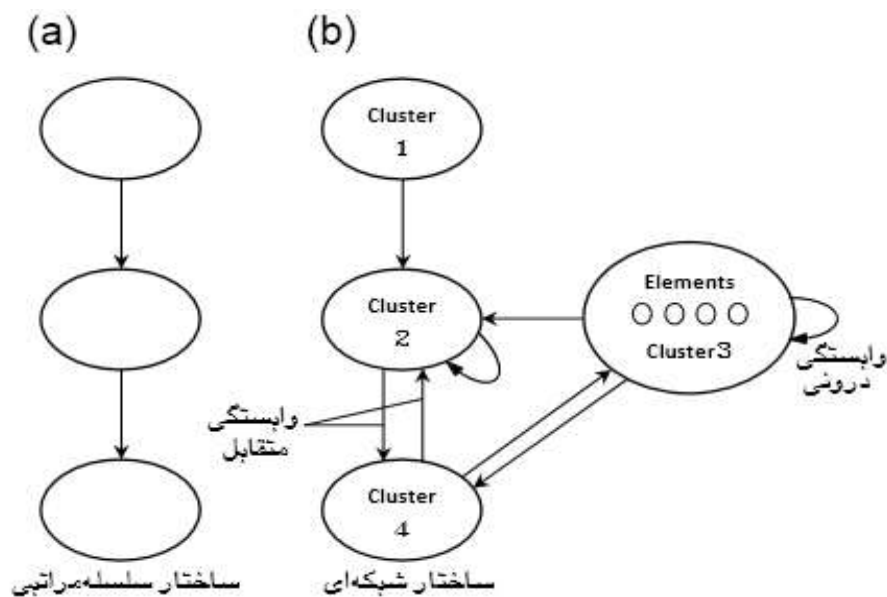
فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

برای پی‌جویی مناطق آبی با پتانسیل‌های مختلف از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای استفاده شده است. فرایند تحلیل شبکه‌ای، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توماس ال‌ساعتی^۲ در سال ۱۹۸۰ آن را توسعه داده است.

^۱. Local Polynomial Interpolation

^۲. Thomas L. Saaty

در این مدل، معیارها به‌مثابه عناصر داخل دسته‌هایی به نام خوشه قرار می‌گیرند. این مدل، شبکه‌ای از ارتباطات بین عناصر خوشه‌های مختلف (وابستگی خارجی) و نیز ارتباطات بین عناصر داخل یک خوشه (ارتباطات داخلی) است؛ درحقیقت مدل ANP روابط متقابل بین مؤلفه‌ها را نیز نشان می‌دهد (Saaty, 1980: 70; Saaty and Vargas, 2006: 213). مدل ANP به‌جای سلسله‌مراتب از ساختار شبکه‌ای بهره می‌برد و علاوه بر داشتن همه ویژگی‌های مدل AHP شامل سادگی، انعطاف‌پذیری، به‌کارگیری معیارهای کمی و کیفی به‌طور همزمان، انجام مقایسه‌های زوجی و بررسی سازگاری در قضاوت‌ها، قادر به برقراری ارتباطات متقابل و دوسویه و وابستگی‌های داخلی علاوه بر روابط سلسله‌مراتبی در شبکه است (García-Melón et al., 2008: 143)؛ (شکل ۱).



شکل ۱. تفاوت ساختاری بین یک سلسله‌مراتب و شبکه (زبردست، ۱۳۸۹: ۸۰)

فرایند تحلیل شبکه‌ای در ۴ مرحله اجرا می‌شود؛ گام نخست، تعیین مسئله تصمیم‌گیری و ارائه آن در یک مدل شبکه‌ای است. در این مرحله، پس از تعیین مسئله تصمیم‌گیری و عوامل مؤثر بر آن، باید یک مدل شبکه‌ای تشکیل شود. این مدل شامل مسئله تصمیم‌گیری، خوشه‌ها، عناصر و وابستگی‌های داخلی و خارجی بین آنهاست. برای تهیه این ساختار شبکه‌ای، روش‌های مختلفی از جمله روش طوفان فکری، روش دلفی، روش گروه اسمی یا روش‌های ریاضی نظیر DEMATEL وجود دارد. در این شبکه، وابستگی‌های خارجی به‌صورت پیکان و وابستگی‌های داخلی به‌صورت کمان نشان داده می‌شود (زبردست، ۱۳۸۹: ۸۱).

گام دوم، تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی و استخراج بردارهای اولویت است. در این مرحله، عناصر تصمیم در هریک از خوشه‌ها، براساس میزان اهمیتشان در ارتباط با معیارهای کنترلی دوبه‌دو مقایسه می‌شوند (همان). همانند مدل AHP برای بیان برتری در ماتریس‌های مقایسه زوجی از اعداد ۱ تا ۹ و معکوس آنها استفاده می‌شود (جدول ۱)؛ (Saaty, 1980: 163).

جدول ۱. مقادیر ترجیحات و قضاوت کارشناسی برای مقایسه زوجی

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً مهم تر یا کاملاً مطلوب تر (Extremely preferred)
۷	اهمیت خیلی قوی (Very strongly preferred)
۵	اهمیت یا مطلوبیت قوی (Strongly preferred)
۳	کمی مطلوب تر یا کمی مهم تر (Moderately preferred)
۱	اهمیت یا مطلوبیت یکسان (Equally preferred)
۲-۴-۶-۸	اولویت بین فواصل

پس از نوشتن ارجحیت‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی، بردار اهمیت داخلی که بیان‌کننده اهمیت نسبی عناصر یا خوشه‌هاست، با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$A \times W = \lambda_{\max} \times W \quad (1)$$

در این رابطه، A ماتریس مقایسه دودویی معیارها، W بردار ویژه (ضریب اهمیت) و λ_{\max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه عددی است. تعیین صحت ماتریس‌های مقایسه زوجی با محاسبه نسبت سازگاری (CR) انجام می‌شود:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

در آن، CI شاخص سازگاری و n تعداد مؤلفه‌های مقایسه شده در ماتریس است.

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

در آن، CR نسبت پایداری و RI شاخص تصادفی است که به تعداد عناصر مقایسه شده بستگی دارد. مقایسه دوبه‌دو زمانی پذیرفته خواهد بود و پایداری خواهد داشت که نسبت پایداری کمتر از ۰/۱ به دست آید (Saaty, 1980: 103; Saaty and Vargas, 2006: 213; Malczewski, 1999: 53).

گام سوم، تشکیل سوپرماتریس است. یک سوپرماتریس روابط موجود در ساختار شبکه‌ای و نیز وزن‌های نسبی محاسبه شده در مرحله دوم را ارائه می‌دهد؛ در واقع از اجتماع همه بردارهای اولویت محاسبه شده برای تک تک ماتریس‌های مقایسه زوجی در یک ماتریس، سوپرماتریس به دست می‌آید (Lami and Abastante, 2014: 13). در فرایند تحلیل شبکه‌ای سه نوع سوپرماتریس ساخته می‌شود؛ سوپرماتریس اولیه (ناموزون): از وارد کردن همه بردارهای ویژه به دست آمده از ماتریس‌های مقایسه زوجی به ماتریس اولیه به دست می‌آید؛ سوپرماتریس موزون: از ضرب ارزش‌های موجود در سوپرماتریس ناموزون در وزن هر خوشه به دست می‌آید؛ سپس این سوپرماتریس نرمالیزه و از نظر ستونی به حالت تصادفی تبدیل می‌شود (Lami and Abastante, 2014: 13; Saaty and Vargas, 2006: 213)؛ سوپرماتریس حد: اگر همه عناصر سوپرماتریس موزون تا جایی که بتوان برسد که همگرایی حاصل و به بیان دیگر ارزش‌های همه ستون‌های ماتریس یکسان شود، سوپرماتریس حد تشکیل می‌شود که هر ستون آن نشان دهنده بردار اولویت کلی است (رابطه ۴)؛ (Lami and Abastante, 2014: 13).

$$\lim_{K \rightarrow \infty} [W^K] \quad (4)$$

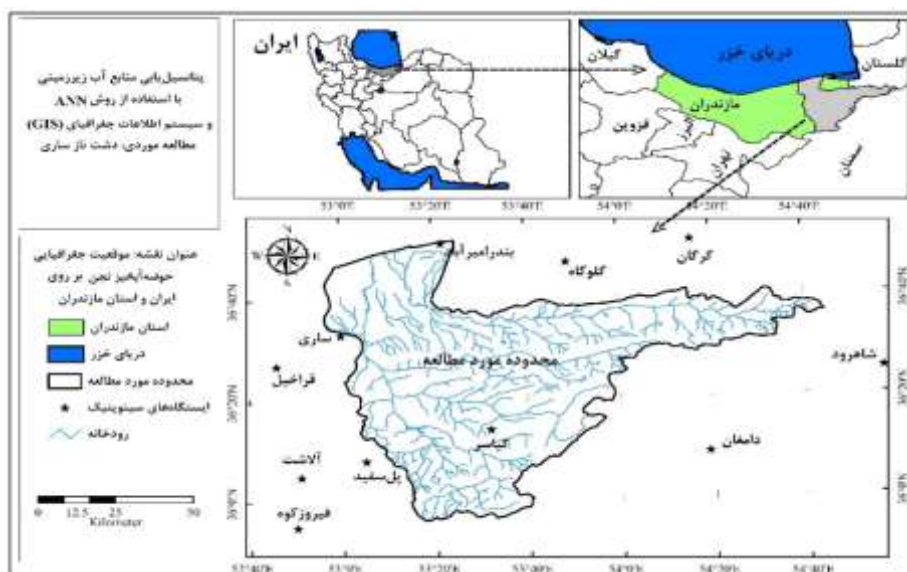
گام چهارم، محاسبه وزن نهایی معیارهاست. این گام، آخرین مرحله در مدل ANP است که در آن با تشکیل سوپرماتریس حد بردار، وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها به دست می‌آید (همان).

منحنی ویژگی‌های عامل نسبی (ROC)

منحنی ROC، روش کمی و گرافیکی مناسبی برای تعیین میزان دقت مدل‌های پیش‌بینی مکانی و روش‌های داده‌کاوی محسوب می‌شود. در این منحنی، میزان مثبت واقعی (روی محور X) و میزان مثبت کاذب (روی محور Y) در آستانه‌های مختلف نشان داده می‌شود (Kumar and Indrayan, 2011: 228). هنگامی که حساسیت افزایش یابد، میزان مثبت کاذب نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین منحنی ROC به ما اجازه می‌دهد میزان مثبت واقعی و مثبت کاذب را در هر نقطه روی منحنی بررسی و مقایسه کنیم (Akobeng, 2007: 645). مساحت زیر این منحنی (AUC)، بیان‌کننده میزان دقت نقشه نهایی به صورت کمی و توانایی مدل در پیش‌بینی درست است. مساحت یادشده با نرم‌افزارهای آماری همچون Medcalc 13.3 با استفاده از اطلاعات استفاده‌نشده‌ای محاسبه می‌شود که برای اعتبارسنجی به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود. در حالتی ایدئال، مقدار زیر نمودار برابر یک خواهد بود. این شاخص برای ارزیابی صحت مدل، شاخص مناسبی است (سادات‌هاشمی و همکاران، ۱۳۸۳: ۱۴۹). در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی دقت نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی از ۳۰ درصد داده‌ها استفاده شد.

محدوده پژوهش

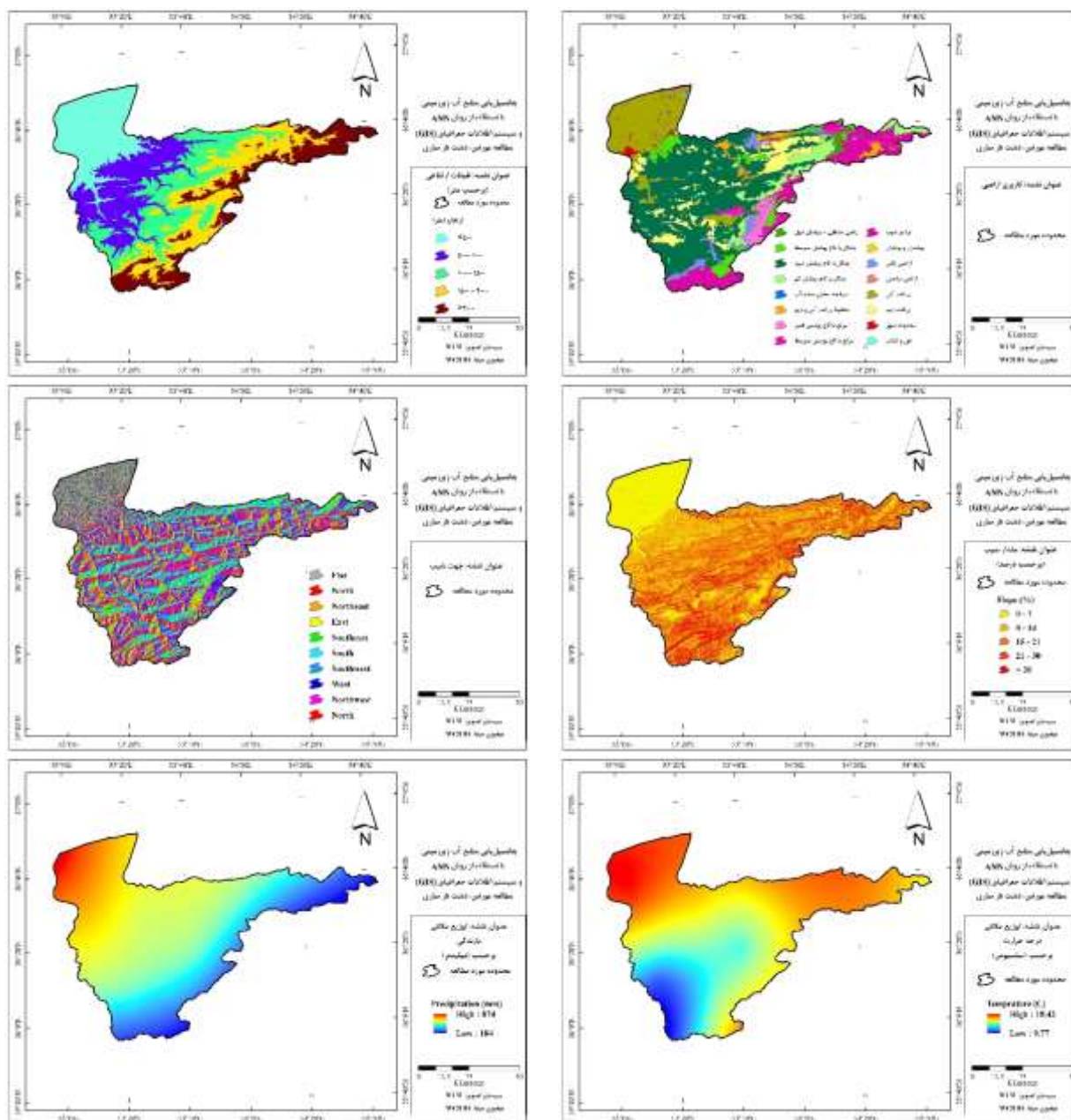
حوضه آبخیز تجن (حوضه منتهی به دشت ناز) در منطقه‌ای در ۲۹ کیلومتری شمال شرق شهرستان ساری در استان مازندران واقع شده است. مساحت این منطقه بیش از ۴۱۸۷/۲۸ کیلومترمربع و حداکثر ارتفاع آن ۳۷۰۰، حداقل ارتفاع آن ۲۶- و ارتفاع متوسط آن ۱۲۶۷ متر از سطح دریاست. شیب متوسط حوضه نیز معادل ۱۴ درجه است. این حوضه بین طول ۵۶' ۵۲° تا ۴۴' ۵۴° شرقی و عرض ۵۸' ۳۵° تا ۴۹' ۳۶° شمالی به صورت توده جنگلی در جلگه‌ای هموار واقع شده است. این منطقه با متوسط بارندگی سالیانه ۵۶۰/۰۵ میلی‌متر از لحاظ اقلیمی جزو مناطق مرطوب به شمار می‌رود و تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و مرطوب دارد. در شکل ۲، موقعیت منطقه نشان داده شده است.

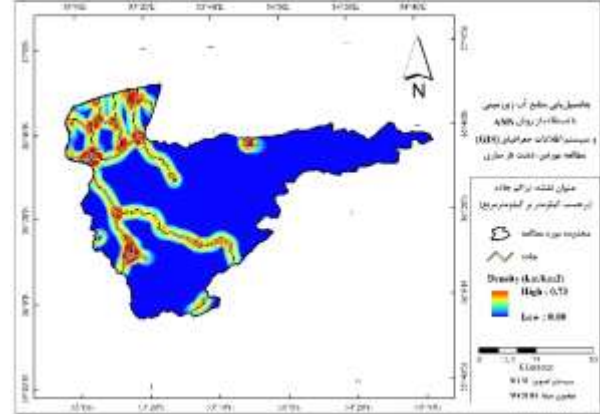
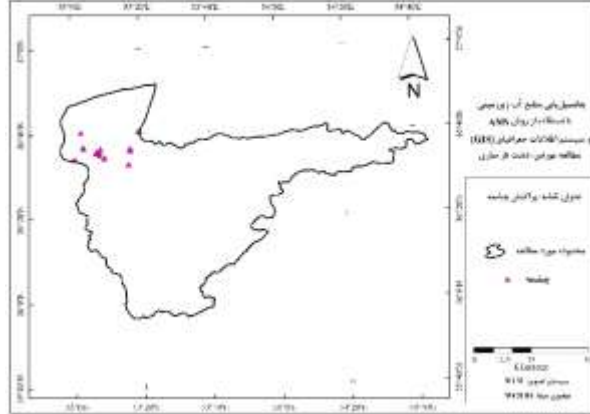
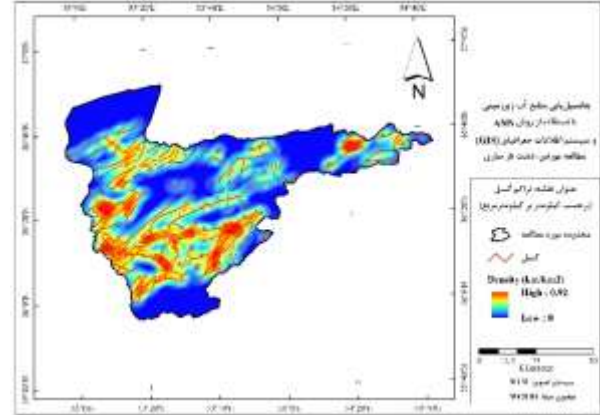
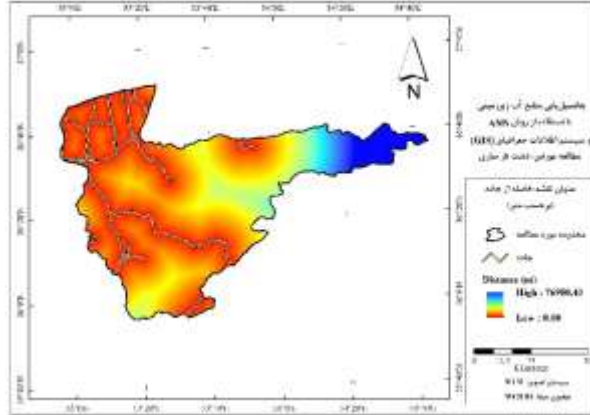
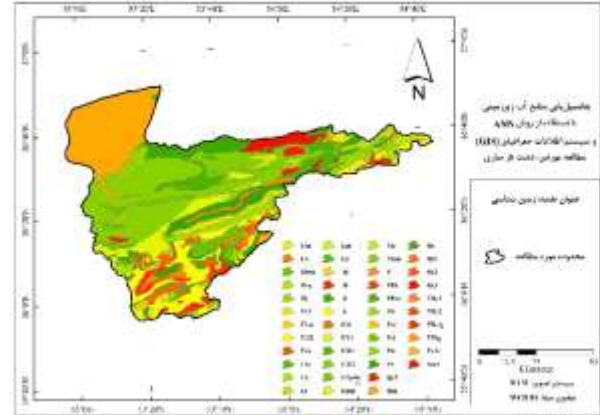
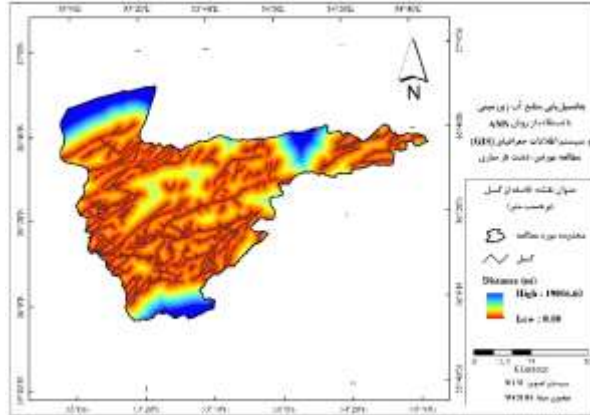
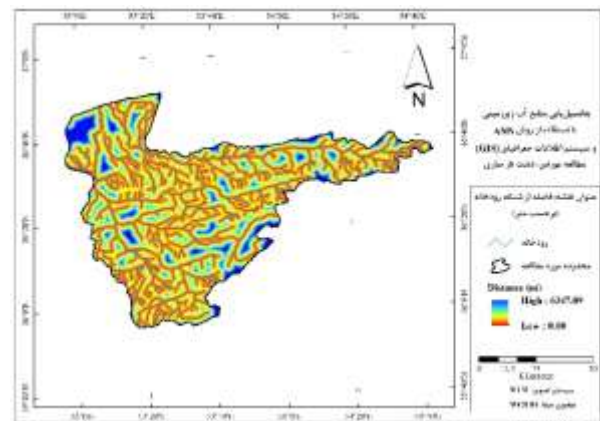
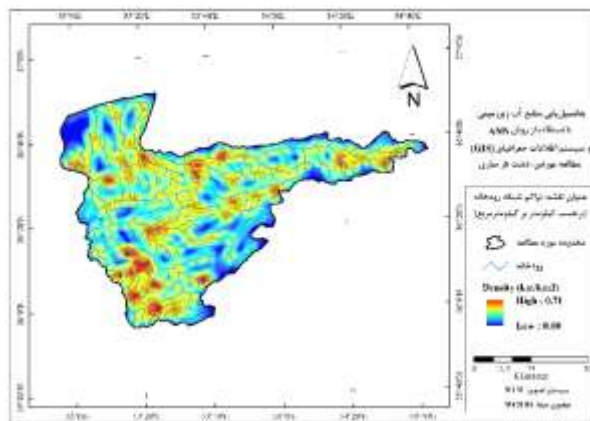


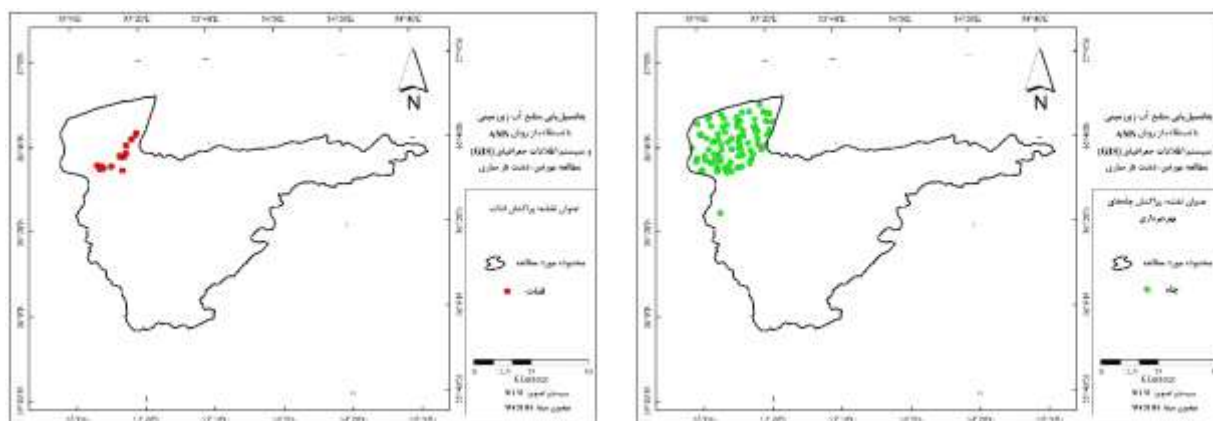
شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه بررسی شده در استان و کشور

یافته‌های پژوهش

با توجه به اینکه هدف پژوهش، پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز منتهی به دشت ناز ساری است، ۱۳ متغیر تأثیرگذار بر نفوذپذیری خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی به‌منابه متغیرهای مستقل و لایه اطلاعات مکانی منابع آبی حوضه شامل ۳ لایه چاهها، چشمه‌ها و قنوات به‌منابه متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. این عوامل شامل لایه‌های اقلیمی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، توپولوژی و زیست‌محیطی براساس اهمیتشان در نفوذپذیری خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی در کانون توجه قرار گرفتند (شکل ۳).

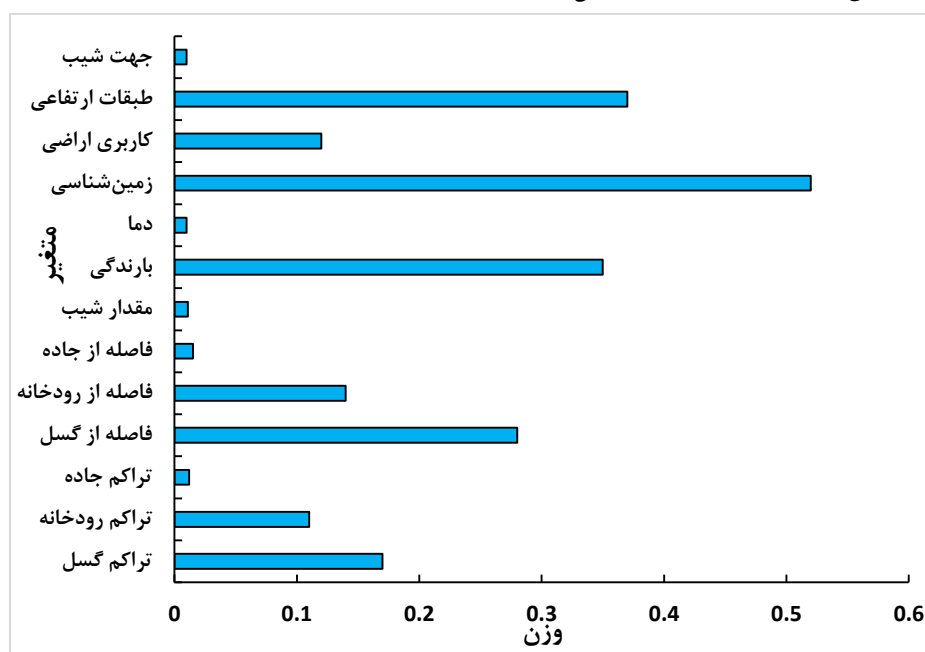






شکل ۳. نقشه پارامترهای مؤثر بر تهیه نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی دشت ناز ساری

در ادامه با وزن دهی هریک از عوامل، سرانجام وزن نسبی آنها براساس روش فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) مشخص شد (شکل ۴)؛ سپس در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.3، لایه رستری هریک از عوامل در بردار وزن آنها ضرب و لایه پتانسیل منابع آب زیرزمینی از راه حاصل جمع لایه‌های نهایی عوامل یادشده تهیه شد. با استناد به مطالعات انجام شده، نقشه تولیدشده به پنج طبقه از نظر پتانسیل منابع آب زیرزمینی شامل مناطق با پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۵).

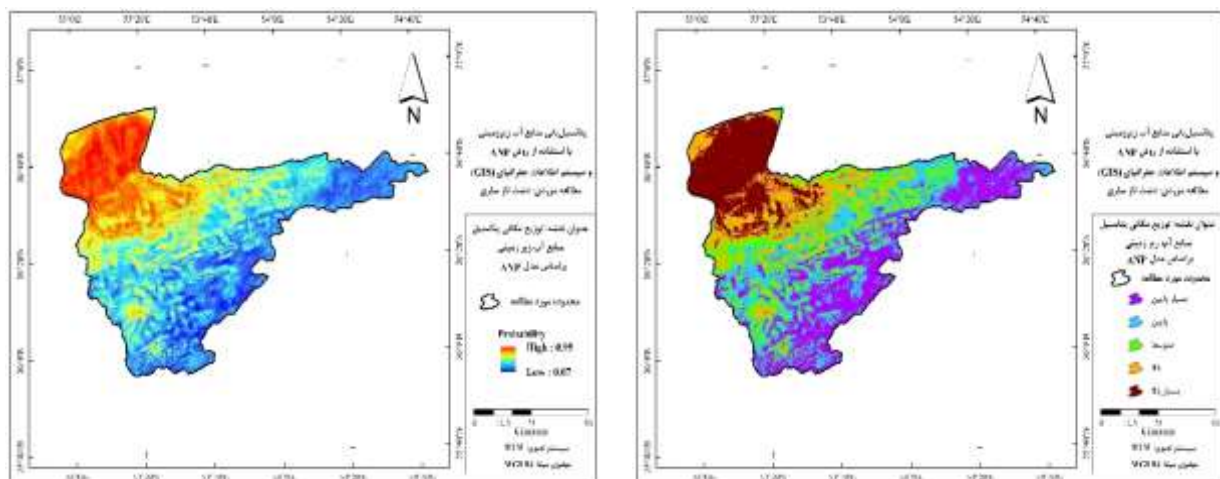


شکل ۴. پارامترهای استفاده شده و وزن آنها به روش ANP

نتایج حاصل از شکل ۴ نشان می‌دهد مهم‌ترین پارامترها در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در منطقه بررسی شده به ترتیب زمین‌شناسی، طبقات ارتفاعی، میزان بارندگی و فاصله از گسل هستند که بیشترین وزن را به خود اختصاص

دادند. وزن زیاد عامل زمین‌شناسی به دلیل تأثیر نوع سازندها و واحدهای لیتولوژیک بر خصوصیات هیدرولوژیکی چون نفوذپذیری، هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال است. در مناطق پایین دست حوضه به دلیل وجود آبرفت‌های درشت‌دانه و پادگانه‌ها هدایت هیدرولیکی زیاد است و ذخیره آبخوان وضعیت خوبی را نشان می‌دهد که در نقشه نهایی نیز شاهد این موضوع هستیم.

پارامتر مؤثر بعدی که وزن حدود ۰/۴ را به خود اختصاص داده، طبقات ارتفاعی است. این عامل نیز با تأثیر بر ضریب رواناب و نفوذپذیری، عامل مهمی در تغذیه آبخوان محسوب می‌شود و در تهیه نقشه پتانسیل‌یابی نقش مهمی دارد. پارامتر بارندگی نیز که عامل اصلی وجود رواناب و جریان در سطح زمین و عامل مهم در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی است، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نقش مهمی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی نیز دارد؛ همچنین به دلیل وجود گسل‌های فعال و غیرفعال در حوضه مدنظر، این عامل از پارامترهای مهم در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی است. وجود تعداد زیادی گسل در حوضه در نفوذ رواناب و تغذیه سفره‌ها و همچنین هدایت جریان زیرسطحی و زیرزمینی نقش مؤثری داشته است.



شکل ۵. نقشه نهایی توزیع مکانی پتانسیل منابع آب زیرزمینی به روش فرایند تحلیل شبکه‌ای دشت ناز ساری

براساس نقشه نهایی، ۹۹۵/۳۵ کیلومترمربع از مساحت منطقه پتانسیل زیاد و بسیار زیاد، ۲۵۴۹/۷۶ کیلومترمربع پتانسیل کم و بسیار کم و ۶۴۲/۱۷ کیلومترمربع پتانسیل متوسط دارد (جدول ۲). مناطق با پتانسیل زیاد بیشتر منطبق بر ارتفاعات کم به علت شیب کمتر، تراس‌های آبرفتی، مخروط‌افکنه‌ها و مناطق دشتی است که در این مناطق امکان نفوذ بیشتر آب‌های سطحی فراهم است. مناطق با پتانسیل کم و بسیار کم منطبق بر ارتفاعات زیاد است که شیب زیادی دارند و فرصت نفوذ جریان سطحی به سفره‌های آب زیرزمینی کم است. با توجه به شکل ۵، مناطق با پوشش جنگلی نقش مهمی در افزایش نفوذ جریان به آبخوان دارند که موجب شده است در این مناطق پتانسیل تغذیه افزایش یابد و در پایین دست این مناطق نیز، به دلیل شیب هیدرولیکی به سمت دشت (ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر و شیب کمتر از ۷ درصد) مناطق با پتانسیل بسیار زیاد از نظر منابع آب زیرزمینی به وجود آید.

جدول ۲. مساحت پهنه‌های پتانسیلی منابع آب زیرزمینی

پهنه‌بندی حوضه از نظر پتانسیل	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
پتانسیل کم و بسیار کم	۲۵۴۹,۷۶	۶۰,۸۹
پتانسیل متوسط	۶۴۲,۱۷	۱۵,۳۴
پتانسیل زیاد و بسیار زیاد	۹۹۵,۳۵	۲۳,۷۷

ارزیابی دقت

به منظور برآورد دقت مدل، از نقشه موقعیت منابع آب شامل چاهها، چشمه‌ها و قنوات موجود در حوضه استفاده شد. با مقایسه نقشه موقعیت منابع آبی حوضه با نقشه پتانسیل برآورد شده مشخص شد بیشتر این منابع در مناطق با پتانسیل زیاد قرار داشتند که این امر بیان‌کننده دقت روش ANP در تولید نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی است. جدول ۳ تعداد منابع آبی و درصد آنها را در هر یک از طبقات نقشه پتانسیل نشان می‌دهد.

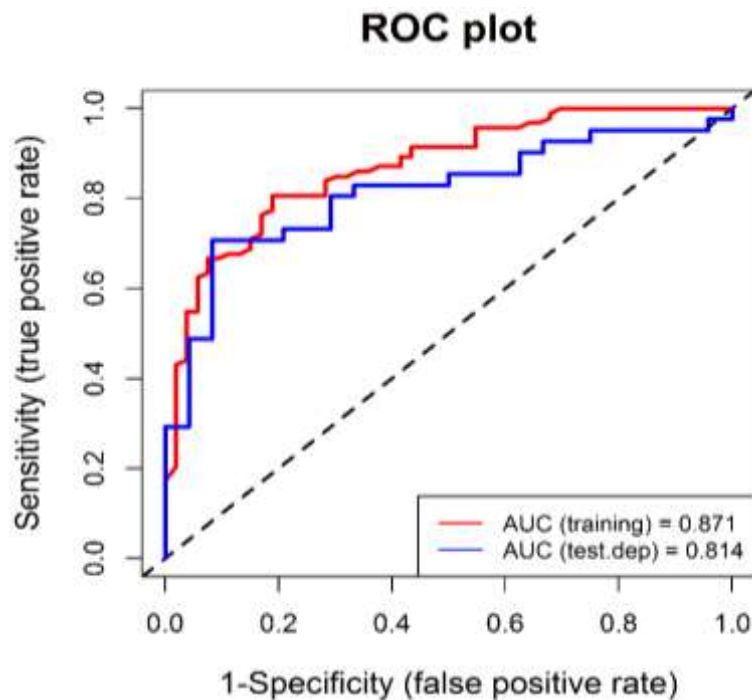
جدول ۳. نتایج بررسی دقت پتانسیل یابی

پهنه‌های نقشه پتانسیل یابی	تحلیل شبکه‌ای	
	تعداد منابع آبی	درصد منابع آبی
پتانسیل کم و بسیار کم	۰	۰
پتانسیل متوسط	۱	۰,۸۲
پتانسیل زیاد و بسیار زیاد	۱۲۱	۹۹,۱۸
جمع	۱۲۲	۱۰۰

با توجه به جدول ۳، بیشترین درصد منابع آبی در محدوده با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد حوضه واقع شده است که نشان‌دهنده صحت نقشه پتانسیل یابی تولید شده است؛ همچنین نتایج این جدول نشان می‌دهد در مناطق با پتانسیل کم آب زیرزمینی، هیچ‌یک از منابع آبی حوضه وجود ندارد.

اعتبارسنجی نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی

لایه اطلاعات مکانی ۱۴۲ چاه پیرومتری موجود در حوضه تهیه و برای تولید نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی از تعداد ۱۰۰ حلقه چاه (۷۰ درصد کل چاهها) در مرحله واسنجی مدل استفاده شد. به منظور اعتبارسنجی نقشه نهایی پتانسیل یابی آب زیرزمینی تولید شده نیز، از تعداد ۴۲ حلقه چاه (۳۰ درصد کل چاهها) استفاده شد که در مرحله قبل از آنها استفاده نشد. در نهایت اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی ROC در محیط نرم‌افزار Medcalc 13.3 انجام شد. شکل ۶، نتایج اعتبارسنجی مدل را در تولید نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی نشان می‌دهد.



شکل ۶. منحنی ROC مربوط به اعتبارسنجی نقشه پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی دشت ناز ساری

نتایج حاصل از منحنی ROC بیان‌کننده این است که دقت مدل در مرحله آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۱ است؛ این امر نشان‌دهنده دقت زیاد این روش در تهیه نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در دشت ناز ساری است. کم بودن مقدار AUC در مرحله آموزش و اعتبارسنجی مدل نیز نشان می‌دهد در مرحله اعتبارسنجی از درصد کمتری از چاهها (۳۰٪) استفاده شده است.

نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر با افزایش جمعیت، نیاز به آب سالم و قابل شرب روند صعودی داشته است و منابع آب سطحی نیز با مسئله آلودگی و تغییرات حجمی روبه‌رو هستند؛ در نتیجه نگاه برنامه‌ریزان به سوی منابع آب زیرزمینی سوق یافته است. دستیابی به آب‌های زیرزمینی، یکی از اصلی‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های اجرایی پروژه‌های زیربنایی و اقتصادی محسوب می‌شود. معمول‌ترین روش دستیابی به این آب‌ها، حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق است که برای تأمین آب کشاورزی و صنعتی استفاده می‌شود.

مهم‌ترین منابع گردآوری اطلاعات درباره عوارض سطحی مربوط به آب‌های زیرزمینی شامل سنگ‌شناسی، عوارض ساختاری، توپوگرافی، کاربری اراضی و ژئومورفولوژی است. این اطلاعات به‌سادگی به‌مثابه ورودی در محیط GIS برای یکپارچه‌سازی با دیگر انواع داده‌ها و آنالیز آنها در شناخت منابع آب زیرزمینی مناطق مختلف کاربرد دارد. هدف این پژوهش نیز، شناخت منابع آب زیرزمینی با استفاده از نقشه‌های پتانسیل‌یابی این منابع است. به این منظور از روش آماری ANP در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره گرفته شد.

بر اساس نقشه نهایی پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی، پهنه‌های با پتانسیل زیاد و بسیار زیاد، بیشتر منطبق بر ارتفاعات کم به علت شیب کمتر، تراس‌های آبرفتی، مخروط افکنه‌ها و مناطق دشتی است؛ همچنین پهنه‌های با پتانسیل کم و بسیار کم منطبق بر مناطق با ارتفاع زیاد است که شیب زیادی نیز دارند. با بررسی طبقات نقشه مدل می‌توان نتیجه گرفت که نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی تهیه شده به روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)، هماهنگی و تشابه زیادی با منابع آب موجود دارد؛ به طوری که حدود ۲۳/۷۷ درصد از مساحت منطقه بررسی شده با پتانسیل زیاد و بسیار زیاد از نظر آب زیرزمینی تشخیص داده شد که در این مساحت، بیش از ۹۹ درصد از منابع آبی وجود دارد.

بر اساس نقشه نهایی، ۹۹۵/۳۵ کیلومتر مربع از مساحت منطقه پتانسیل زیاد و بسیار زیاد، ۲۵۴۹/۷۶ کیلومتر مربع پتانسیل کم و بسیار کم و ۶۴۲/۱۷ کیلومتر مربع پتانسیل متوسط دارد. بر اساس روش ANP نیز، عوامل زمین‌شناسی و ارتفاع، بیشترین تأثیر را بر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در منطقه مدنظر دارند. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پیش‌بینی مناطق با احتمال وجود آب زیرزمینی است. در نهایت برای اعتبارسنجی نقشه پتانسیل یابی آب‌های زیرزمینی در منطقه از منحنی ROC استفاده شد که نتیجه ۸۷ درصدی این منحنی نیز، حاکی از دقت زیاد این روش در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی است. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج پژوهشگرانی چون رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۵)، فرجی سبکبار و همکاران (۱۳۹۰) و ایشیری و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد.

منابع

- رحیمی، داریوش، موسوی، سید حجت، (۱۳۹۱). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل AHP و تکنیک GIS؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز شاهرود- بسطام، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، 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، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دوره ۱۰، شماره ۳۵، ۲۷-۳۸.
- رضایی مقدم، محمدحسین، رحیم‌پور، توحید، نخستین‌روحي، مهسا، (۱۳۹۵). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی؛ مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز منتهی به دشت تبریز، اکوهیدرولوژی، دوره ۳، شماره ۳، ۳۷۹-۳۸۹.
- زبردست، اسفندیار، (۱۳۸۹). کاربرد فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی، دوره ۲، شماره ۴۱، ۷۹-۹۰.
- سادات هاشمی، سید مهدی، قربانی، راهب، کاوه‌ای، بهروز، (۱۳۸۳). تحلیل منحنی‌های ROC برای مقایسه تست‌های تشخیص پزشکی، فصلنامه کومش، دوره ۶، شماره ۲، ۱۴۵-۱۵۰.

- صابری، عظیم، رنگرن، کاظم، مهجوری، رضا، کشاورزی، محمدرضا، (۱۳۹۱). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و GIS به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در تاق‌دیس کمستان استان خوزستان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۲، شماره ۶، ۱۱-۲۰.
- عباسی، ثریا، حیدری، مسعود، (۱۳۹۵). ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های AHP و منطق فازی؛ مطالعه موردی: حوضه شمالی استان ایلام، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۲، شماره ۶، ۷۵-۹۳.
- علیزاده، امین، (۱۳۹۴). اصول هیدروژئولوژی کاربردی، چاپ ۴۰، ویرایش ۷، مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا(ع)، ۹۴۲ صفحه.
- فتحی‌زاد، حسن، علیپور، حمید، هاشمی‌نسب، سیده‌نگار، کریمی، حاجی، (۱۳۹۵). پتانسیل یابی آب‌های زیرزمینی از طریق فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه مهدی‌شهر، نشریه هیدروژئومورفولوژی، دوره ۲، شماره ۸، ۱-۲۰.
- فرجی سبکبار، حسنعلی، نصیری، حسین، حمزه، محمد، طالبی، سمیه، رفیعی، یوسف، (۱۳۹۰). تعیین عرصه‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی بر پایه تلفیق روش‌های ANP و مقایسه زوجی در محیط GIS؛ مطالعه موردی: دشت گربایگان فسا، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۲، شماره ۴، ۱۴۳-۱۶۶.
- فلاح، فاطمه، دانش‌فر، مانیا، قربانی‌نژاد، سمیرا، (۱۳۹۶). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی خرم‌آباد با استفاده از روش شاخص آماری، نشریه آب و توسعه پایدار، دوره ۴، شماره ۱، ۸۹-۹۸.
- مفیدی‌فر، مهدی، اصلاح، مهدی، حسن‌آبادی، علی، (۱۳۹۴). مقایسه مدل‌های تصمیم‌گیری تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی حوضه دشت یزد- اردکان در محیط GIS، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۶، شماره ۱، ۱۴۷-۱۵۶.
- هاتف، حکیمه، دانشور کاخکی، محمود، کهنسال، محمدرضا، بنیان، محمد، شاهنوشی روشانی، ناصر، (۱۳۹۵). بررسی آسیب‌پذیری اقتصادی از نوسانات اقلیمی؛ مطالعه موردی: استان خراسان رضوی، نشریه هواشناسی کشاورزی، جلد ۴، شماره ۲، ۶۱-۷۰.

Adeyeye, O.A., Ikpokonte, E.A., Arabi, S.A., (2019). **GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria**, the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, Vol 22 (2): 175- 181.

Akinlalu, A.A., Adegbuyiro, A., Adiat, K.A.N., Akeredolu, B.E., Lateef, W.Y., (2017). **Application of multi-criteria decision analysis in prediction of groundwater resources potential: A case of Oke-Ana, Ilesa Area Southwestern, Nigeria**. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Vol 6 (1): 184-200.

Akobeng, A.k., (2007). **Understanding diagnostic tests 3: receiver operating characteristic curves**, Acta Paediatrica, Vol 96 (5): 644- 647.

Chowdhury, A., Jha, M.K., Chowdar, V.M., (2010). **Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques**. Environmental Earth Sciences, Vol 59 (6): 1209- 1222.

Dar, I.A., Sankar, K., Dar, M.A., (2010). **Remote Sensing Technology and Geographic Information System Modeling: An integrated Approach towards the Mapping of groundwater Potential Zones in Hard Rock Terrain, Mamundiyyar Basin**, Journal of Hydrology, Vol 394 (3-4): 285- 295.

- Etishree, A., Rajat, A., Garg, R.D., Garg, P.K., (2013). **Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach**, Journal of Earth System Science, Vol 122 (3): 887- 898.
- García-Melón, M., Ferrís-Oñate, J., Aznar-Bellver, J., Aragonés-Beltrán, P., Poveda-Bautista, R., (2008). **Farmland appraisal based on the analytic network process**, Journal of Global Optimization, Vol 42 (2): 143- 155.
- Görener, A., (2012). **Comparing AHP and ANP: An Application of Strategic Decisions Making in a Manufacturing Company**, International Journal of Business and Social Science, Vol 3 (11): 194- 208.
- Jha, M.K., Kamii, Y., Chikamori, K., (2009). **Cost-effective Approaches for Sustainable Groundwater Management in Alluvial Aquifer Systems**, Water Resources Management, Vol 23 (2): 219- 233.
- Kumar, R., Indrayan, A., (2011). **Receiver operating characteristic (ROC) curve for medical researchers**, Indian pediatrics, Vol 48 (4): 277- 287.
- Lami, I.M., Abastante, F., (2014). **Decision making for urban solid waste treatment in the context of territorial conflict: Can the Analytic Network Process help?**, Land Use Policy, Vol 41: 11- 20.
- Magesh, N.S., Chandrasekar, N., Soundranayagam, J.P., (2012). **Delineation of Groundwater Potential Zones in Theni District, Tamil Nadu, Using Remote Sensing, GIS and MIF Techniques**, Geoscience Frontiers, Vol (3) 2: 189- 196.
- Malczewski, J., (1999). **GIS and Multicriteria Decision Analysis**, New York. J. Wiley & Sons, 392 p.
- Meshram, K.S., Mukharjee, A.P., Tripathi, M.P., Senger, S.S., Sarawgi, S.K., Dave, A.K., (2010). **Effect of Artificial Recharge Structures on Ground Water Availability in Semi-critical Area in Chhattisgarh**, M.Sc. Thesis in Agricultural Engineering (Soil and Water Engineering), Indira Grandhi Kirishi Vishwavidyalaya, Raipur, India, 328 p.
- Murasingh, S., Jha, R., Adamala, S., (2018). **Geospatial technique for delineation of groundwater potential zones in mine and dense forest area using weighted index overlay technique**, Groundwater for Sustainable Development, Vol 7: 387- 399.
- Patra, S., Mishra, P., Mahapatra, S.Ch., (2018). **Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: A case study from Ganga Alluvial Plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process**, Journal of Cleaner Production, Vol 172: 2485- 2502.
- 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, Vol 55 (3): 467- 475.
- Saaty, T.L., (1980). **The Analytic Hierarchy Process**. New York, McGraw Hill.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., (2006). **Decision Making with the Analytic Network Process**, New York. Springer Science, Second Edition, Vol 195, 370 p.
- Singh, L.K., Jha, M.K., Chowdary, V.M., (2018). **Assessing the accuracy of GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis approaches for mapping groundwater potential**, Ecological Indicators, Vol 91: 24-37.
- Ye, H.F., Cheng, Y.S., Lin, H., Lee, Ch.H., (2016). **Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan**, Sustainable Environment Research, Vol 26 (1): 33-43.

