صص ۲۰-۱

مقایسه کارایی مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل شبکه در پتانسیل سنجی منابع آب کارست مطالعه موردی: شهرستان بیرجند

محسن رضائی عارفی*
استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
مریم ربیعی گسک
استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۵/۶ تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۷/۲۳

چکیده

در مناطق خشک باتوجه‌به اینکه کارست‌ها مناطق مناسبی برای ذخیرهٔ سفره‌های آب شیرین محسوب می‌شوند، شناسایی آنها اهمیت دوچندانی می‌یابد. هدف از این پژوهش کارایی مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل شبکه در پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند است. در این پژوهش با مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و کاربری اراضی به‌عنوان نقشه‌های عامل در نظر گرفته شدند. همچنین به‌منظور استخراج مدل پتانسیل‌یابی منابع آب کارست، شیپ فایل‌ها فراخوانی شدند. لایه‌های اطلاعاتی متفاوت با اعمال نظرات کارشناسی و مشاهدات میدانی به‌صورت نقشه‌های معیار طبقه‌بندی شدند. درنهایت باتوجه‌به اوزان به‌دست‌آمده در هر دو مدل AHP و ANP، نقشه پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند به دست آمد. نتایج حاصله نشان داد که در مدل AHPاز کل مساحت شهرستان بیرجند، ۲۶/۴۰ درصد در طبقه خیلی کم‌توسعه یافته، ۲۷/۵۸ درصد در طبقه کم‌توسعه یافته، ۲۳/۸۶ درصد در طبقه متوسط، ۱۵/۷۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۶/۴۰ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است. در مدل ANP از کل مساحت شهرستان بیرجند،۱۱/۷۵ درصد در طبقه خیلی کم‌توسعه یافته، ۳۲/۲۸ درصد در طبقه کم‌توسعه یافته، ۲۹ درصد در طبقه متوسط، ۱۸/۸۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۸ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است؛ بنابراین نتایج تحقیق نشان داد که در کارایی دو روش در اعتبارسنجی با لایه چاه و قنات، مدل ANP از اعتبار بیشتر برخوردار است؛ چون بعد از هم‌پوشانی دولایه، تعداد چاه و قنات بیشتری بر روی مناطق کارست توسعه‌یافته و خیلی توسعه‌یافته در داخل لایه آبخوان قرار گرفت.

واژگان کلیدی: **بحران آب، منابع آب کارست، اعتبارسنجی، شهرستان بیرجند.**

مقدمه

پدیده کارست عمدتاً در سنگ‌های قابل انحلال، به‌ویژه سنگ‌آهک، مرمر و دولومیت (سنگ‌های کربناته) شکل می‌گیرد. با این حال در سنگ‌های تبخیری نظیر ژیپس و نمک نیز مشاهده می‌شود. (خوش‌رفتار،۱۳۹۵). کارست به‌عنوان یکی از

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۱۳۳۷۳۵۲ Email: rezaei.arefi@cfu.ac.ir

پدیده‌های مهم ژئومورفولوژیکی ویژگی‌های خاص در زمینه هیدرولوژی و مورفولوژی دارد که ناشی از انحلال‌پذیری بالا، توسعه تخلل ثانویه و تأثیر عوامل تکتونیکی در شکل‌گیری آن است (وال[۱]،۲۰۱۵). پتانسیل‌یابی این منابع با ارزش در مدیریت منابع آب به‌خصوص در سازندهای سخت که به‌صورت پراکنده در سطح زمین پراکنده هستند از اهمیت زیادی برخوردار است (واعظی هیر و همکاران،۱۴۰۳). یکی از مهم‌ترین منابع موجود در مناطق کارستی، منابع آب زیرزمینی است، به‌طوری که حدود یک‌پنجم از سطح کره زمین توسط سازندهای کربناته پوشیده شده و این سازندها سهم مهمی در تأمین منابع آبی دارد (بریتیش کلمبیا[۲]،۲۰۰۳). آب‌های زیرزمینی به طور کلی یکی از منابع حیاتی برای جوامع انسانی و نیز فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی به شمار می‌روند (ماناپ و همکاران[۳]،۲۰۱۴). حدود ۲۵ درصد از جمعیت جهان، به‌ویژه در نواحی آسیا، مدیترانه و ایالات‌متحده، آب مورد نیاز خود را از آبخوان‌های کارستی تأمین می‌کنند (فورد و ویلیامز[۴]،۲۰۰۷). این منابع در طی دوره‌های زمانی طولانی و بر اثر تعامل شدید بین آب و سنگ شکل گرفته‌اند و نقش مهمی در توسعه پایدار اجتماعی و اقتصادی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک دارند (هارتمن و همکاران[۵]،۲۰۱۴، معتمدی راد و همکاران،۱۴۰۰). اهمیت شناسایی و مدیریت منابع آب کارستی در کشور ما به دلیل بحران‌های آبی فزاینده، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون مطالعات تخصصی چندانی در زمینه منابع آب کارستی شهرستان بیرجند انجام نشده است. از این رو بررسی و شناسایی دقیق پتانسیل‌های کارستی منطقه هم از نظر علمی و هم در بعد اجرایی در مدیریت بحران آب، اهمیت فراوانی دارد. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند فرایندهای تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در شناسایی و اولویت‌بندی پهنه‌های مستعد منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق کارستی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این مدل‌ها با فراهم کردن امکان تحلیل هم زمان معیارهای متنوع ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، اقلیمی و انسانی ابزارهای مؤثری برای ارزیابی منابع آب کارستی محسوب می‌شوند (ساعتی[۶]،۲۰۱۶؛ ماچفسکی[۷]،۲۰۲۰). باتوجه‌به وابستگی روزافزون شهر بیرجند به منابع آبی جدید و برداشت بیش از ظرفیت از آبخوان‌های آبرفتی موجود، ضرورت شناسایی و بهره‌برداری پایدار از منابع آب کارستی منطقه بیش از پیش احساس می‌شود. پژوهش حاضر باهدف مقایسه کارایی مدل‌های AHP و ANP در ارزیابی و پتانسیل سنجی منابع آبی کارستی شهرستان بیرجند انجام شده است. باتوجه‌به اهمیت مناطق کارستی، پژوهش‌های به نسبت جامعی در جهان در رابطه با توسعه کارست صورت‌گرفته است که در این میان می‌توان به این موارد اشاره کرد: اتیشری و همکاران[۸] (۲۰۱۳) از رویکرد AHP و ANP برای تعیین مناطق پتانسیل آب زیرزمینی استفاده کردند و نشان دادند که مدل ANP به دلیل

1-Waele
2- BritishColumbia
3- Manap et al
4- Ford&Williams
5- Hartmann et al
6-Saaty
7- Malczewski
8- Etishree et al

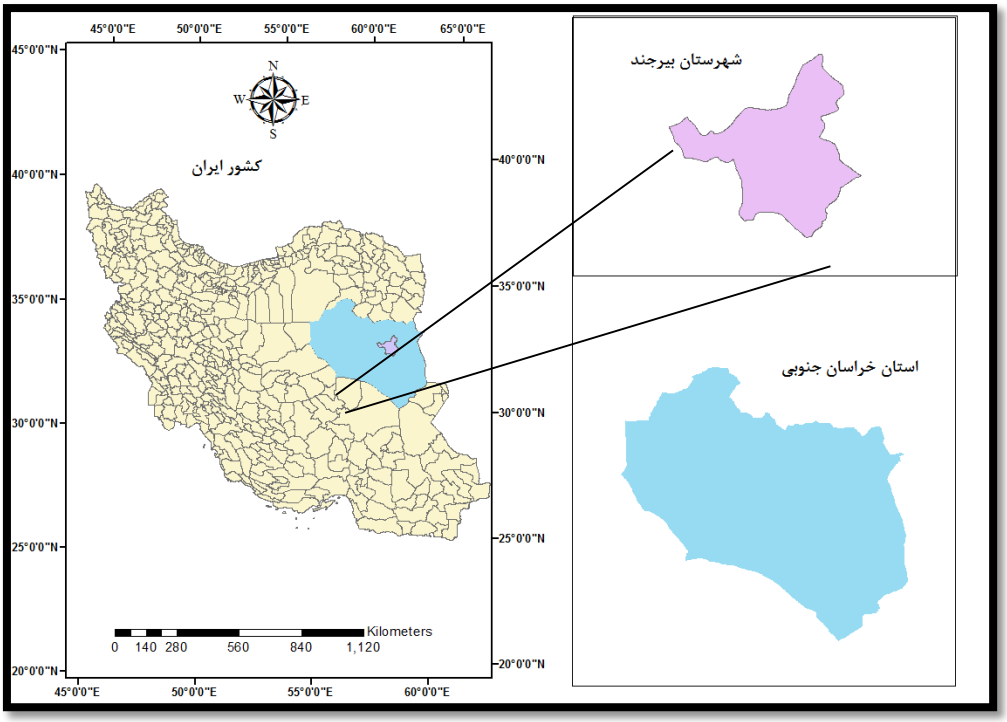
در نظر گرفتن وابستگی بین معیارها، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. اسمیت و همکاران[1] (۲۰۱۵) به این موضوع اشاره داشته‌اند که کارست به دلیل انحلال سنگ‌های کربناته، یکی از منابع اصلی تأمین آب زیرزمینی در بسیاری از کشورهای اروپایی محسوب می‌شود و در مقاله خود درباره مدل‌سازی تغذیه آب‌های زیرزمینی در مناطق کارستی اروپا، دیدگاه‌های جدیدی را ارائه می‌دهند و نشان دادند است که تغذیه آب‌های زیرزمینی در نواحی کارستی می‌تواند به طور دقیق مدل‌سازی شود. دومینگو پینتو و همکاران[2] (۲۰۱۷) با استفاده از GIS، سنجش از دور و تکنیک AHP، مناطق پتانسیل آب زیرزمینی را در حوزه آبخیز کومورو در تیمور شرقی شناسایی کردند. یو و همکارانش [3] (۲۰۲۱) در مقاله‌ای باهدف ارزیابی ویژگی‌های تولید آبخوان‌های کارستی، پارامترهایی مانند توزیع گسل‌ها، مقیاس گسل، ضخامت آبخوان، فشار آب و هدایت هیدرولیکی را به‌عنوان شاخص ارزیابی انتخاب کرده و برای ارزیابی ویژگی‌های تولید آبخوان از روش AHP -CV استفاده کرده و به این نتیجه رسیده که روش AHP می‌تواند در ارزیابی تغذیه آبخوان‌های کارستی مؤثر باشد. در ایران پژوهش‌های مرتبط با موضوع موردمطالعه به این شرح است: پور اکبری و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای در تاقدیس‌های لیلی و کی نو در شمال شرق خوزستان، از مدل AHP برای تعیین پتانسیل منابع آب کارستی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مناطق با پتانسیل بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی طاقدیس‌ها قرار دارند. زنگنه تبار و همکاران (۱۳۹۸) در مقاله‌ای با عنوان بررسی پتانسیل منابع آبی کارست پراو –– یستون به‌عنوان منابع تأمین آب پایدار اکوسیستم‌های زاگرس با اجرای مدل AHP نقشه پتانسیل منابع آب کارست منطقه را به دست آورده است. این نقشه بیان‌کننده تأثیر زیاد دو عامل سنگ‌شناسی و گسل‌ها در پتانسیل منابع آب کارست منطقه می‌باشد. واعظی هیر و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله‌ای با عنوان " پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در واحدهای کارستی آذربایجان غربی با استفاده از روش SUM در پتانسیل‌یابی آبخوان‌های کارستی استان آذربایجان غربی به این نتیجه رسید که ۲۵ درصد از این استان دارای پتانسیل خیلی زیاد و زیاد برای تشکیل آبخوان‌های کارستی است. از آنجایی که منطقه موردمطالعه شهرستان بیرجند می‌باشد، لذا بهره‌برداری از آب مناطق کارستی می‌تواند در تأمین آب شرب شهرستان بیرجند اهمیت زیادی داشته باشد؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر کارایی مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل شبکه در پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند است.

موقعیت منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه، شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی است. شهرستان بیرجند از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۸ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و ۵۸ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۶ دقیقه طول جغرافیایی شرقی قرار گرفته است. این شهرستان با وسعت ۳۹۳۷٫۵ کیلومترمربع در شرق ایران قرار گرفته است. (شکل ۱) بالاترین نقطه ارتفاعی طبق نقشه توپوگرافی ۲۶۸۰ متر در ارتفاعات باقران، حداقل ارتفاع آن ۱۳۶۰ متر در غرب شهرستان

10- Smith et al
1- Domingos et al
2-Yu et al

و میانگین ارتفاع ۱۸۸۴ متر می‌باشد. متوسط دمای سالیانه در ارتفاعات ۱۱,۴ درجه و در دشت ۱۳,۸ درجه سانتیگراد است. متوسط بارندگی سالانه ۱۶۷ میلیمتر است. بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی، بیرجند جزء مناطق خشک محسوب می‌شود که دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. میزان بارش در این شهر باتوجه‌به آب و هوای آن، کم بوده و بیشترین میزان آن، از آذر تا اردیبهشت رخ می‌دهد که در فصل زمستان اغلب به‌صورت بارش برف است. تفاوت نسبتاً زیاد درجه حرارت روز و شب و همچنین اختلاف دمای زمستان و تابستان در این شهرستان به علت نزدیکی آن به مناطق کویری است.

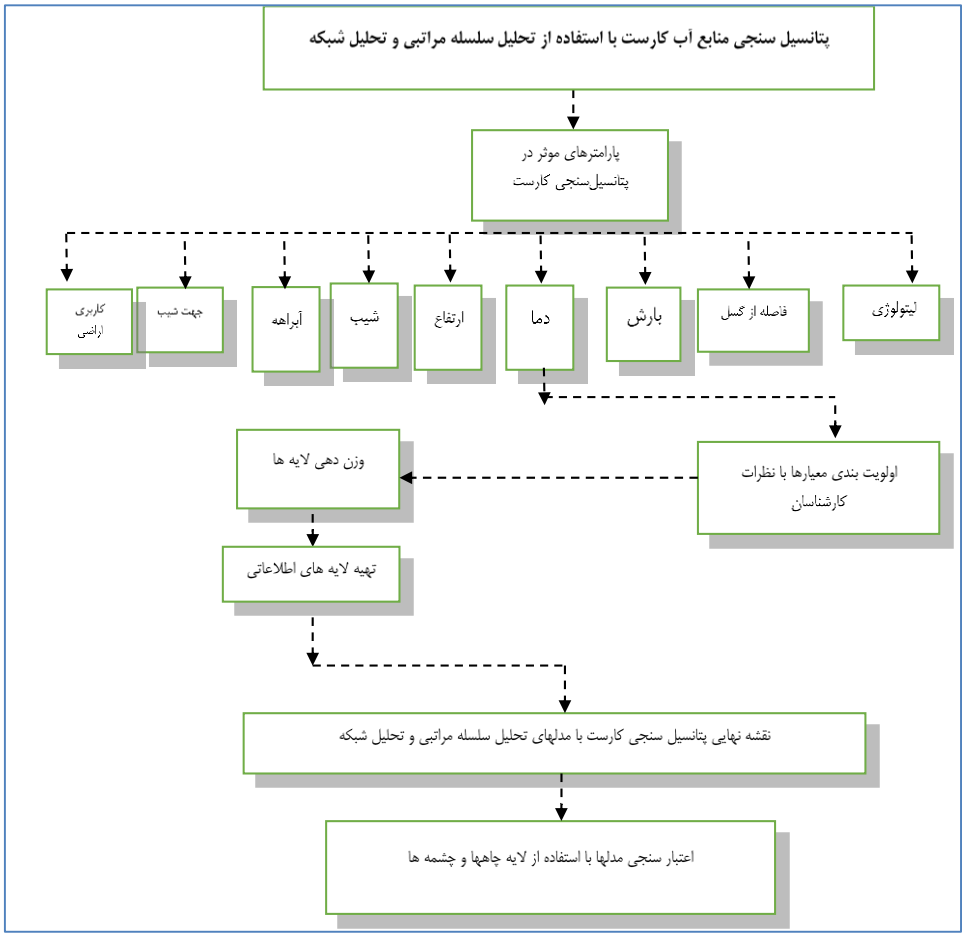


شکل ۱: نقشه موقعیت شهرستان بیرجند

داده‌ها و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از روش‌های میدانی، کتابخانه‌ای و اسنادی صورت‌گرفته است. در ابتدا با استفاده از Dem ۳۰ متر، محدوده موردمطالعه تعیین گردید. با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند جهت استفاده در شناسایی لندفرم‌ها و سازندهای کربناته استفاده گردید. این پژوهش با استفاده از روش‌های AHP و ANP انجام گرفته است. در ابتدا ۹ لایه اطلاعاتی لیتولوژی، فاصله از گسل، اقلیم (بارش و دما)، ارتفاع، شیب، فاصله از آبراهه، جهت شیب و کاربری اراضی بر اساس مطالعه مقالات متعدد در پتانسیل سنجی منابع آب کارست انتخاب شدند. سپس پرسش‌نامه مقایسه زوجی پارامترهای مؤثر بر پتانسیل سنجی منابع آب کارست در اختیار ۱۰ نفر از متخصصان ژئومورفولوژی کارست قرار گرفت. بعد از انجام مرحله مقایسه زوجی پارامترها با یکدیگر، وزن‌های مربوطه وارد نرم‌افزار اکسپرت چویس (Expert Choice) گردید و وزن هر یک از معیارها مشخص گردید. نمودار ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای

اصلی مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست طبق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در نرم‌افزار اکسپرت چویس با مقدار شاخص ناسازگاری ۰/۰۸ محاسبه گردید. بعد از تعیین وزن هر معیار با استفاده از دستور Raster calculator وزن هر معیار در لایه مربوطه ضرب گردید و لایه‌های مربوط به هر معیار با یکدیگر ادغام شده و نقشه پتانسیل‌سنجی منابع آب کارست بر اساس روش AHP تهیه گردید. در روشANP هدف مربوطه در محیط نرم‌افزارSuper Decision که همان پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند است ساخته شد. در مرحله بعد، خوشه‌ها که همان پارامترهای زمین‌شناسی، توپوگرافی، هیدرولوژی و کاربردی اراضی هستند ایجاد گردید و در مرحله بعد در داخل خوشه‌ها پارامترهای لیتولوژی و گسل (زمین‌شناسی)، بارندگی، دما و فاصله از رودخانه (هیدرولوژی)، ارتفاع، شیب و جهت شیب (توپوگرافی) و نهایتاً کاربری اراضی به هر یک قرار داده شدند. سپس با استفاده از دستور Make node connection، خوشه‌ها و معیارها فعال شدند و سپس با استفاده از دستور pair wise comparision در قالب شبکه‌ای با همدیگر مقایسه گردیدند. در مرحله آخر با استفاده از دستور Priority وزن هر یک از معیارها به‌صورت نرمال شده محاسبه شد.



شکل ۲: نمودار فلوچارت مراحل انجام پژوهش

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

AHP یک نظریه کلی برای اندازه‌گیری است. برای استخراج اولویت‌های نسبی در مقیاس‌های مطلق (غیر متغیر تحت تغییر هویت) از مقایسه‌های زوجی گسسته و پیوسته در ساختارهای سلسله‌مراتبی چندسطحی استفاده می‌شود. این مقایسه‌ها ممکن است از اندازه‌گیری‌های واقعی یا از یک مقیاس بنیادی گرفته شود که قدرت نسبی ترجیحات و احساسات را منعکس می‌کند. AHP توجه ویژه‌ای به خروج از سازگاری و اندازه‌گیری این انحراف و وابستگی درون و بین گروه‌های عناصر ساختار خود دارد. این مدل گسترده‌ترین کاربردهای خود را در تصمیم‌گیری چندمعیاره در برنامه‌ریزی و تخصیص منابع و در حل تعارض یافته است. در شکل کلی آن، AHP یک چارچوب غیرخطی برای انجام تفکر قیاسی و استقرایی بدون استفاده از قیاس است. این امر با در نظر گرفتن چندین عامل به طور هم‌زمان امکان‌پذیر می‌شود و امکان وابستگی و بازخورد فراهم می‌شود و مبادلات عددی برای رسیدن به یک ترکیب یا نتیجه‌گیری امکان‌پذیر می‌شود (ساعتی و وارگاس، ۲۰۰۶).

مراحل روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP

برای انجام تحلیل‌های مربوط به روش AHP از نرم‌افزار اکسپرت چویس استفاده گردید. مراحل مختلف این روش به‌صورت زیر است:

مقایسه زوجی

اولین قدم در این روش مشخص کردن معیارها برای انجام تحلیل می‌باشد. بعد از انتخاب معیارها مرحله بعد، مقایسه زوجی معیارها بوده که این امر با استفاده از نظر متخصصان و کارشناسان باتوجه‌به جدول ارائه شده توسط ساعتی انجام گردید. در این مرحله از متخصصان خواسته شد که ارجحیت معیارها را با استفاده از مقیاس ساعتی از عدد ۱ (کم اهمیت) تا عدد ۹ بیشترین اهمیت مشخص نمایند. بعد از تعیین ارجحیت معیارها برای اطمینان از صحت تحلیل‌ها نرخ سازگاری مقایسات محاسبه گردید. نتیجه محاسبه نرخ سازگاری نشان‌دهنده عدد کمتر از ۰/۱ بود که نشان از صحت مقایسات بود (جدول ۱).

جدول ۱: مقایسات زوجی در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به روش (ساعتی، ۱۹۸۰)

مقیاس	قضاوت
۱	برابر
۲	بین برابر تا متوسط
۳	متوسط
٤	بین متوسط تا زیاد
٥	زیاد
٦	بین زیاد تا خیلی زیاد
۷	خیلی زیاد
۸	بین خیلی زیاد تا فوق‌العاده زیاد
۹	فوق‌العاده زیاد

بررسی نرخ سازگاری

سازگاری قضاوت ذهنی را می‌توان با تخمین نسبت سازگاری که مقایسه بین شاخص ثبات و شاخص سازگاری تصادفی است بررسی کرد (جیسوال[1] و همکاران، ۲۰۱۵). برای بررسی نرخ سازگاری از رابطه زیر استفاده شد.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

در این رابطه CR نرخ سازگاری، CI شاخص ثبات است RI شاخص سازگاری تصادفی است. شاخص سازگاری، معیاری است برای سنجش سازگاری که می‌توان با استفاده از معادله زیر تخمین زد:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$$

در این رابطه λ_{max} مقدار ویژه اصلی به دست آمده از ماتریس اولویت است و n اندازه ماتریس مقایسه است.

روش تحلیل شبکه (ANP)

روش تحلیل شبکه به‌وسیله ساعتی در سال ۱۹۸۶ ارائه شد. فرایند تحلیل شبکه‌ای یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش علاوه بر اینکه تمام ویژگی‌های رویکرد سلسله‌مراتبی را به‌صورت گسترده‌تری دارد، وابستگی بین معیارها نیز در آن در نظر گرفته می‌شود. هدف روش تصمیم‌گیری تحلیل شبکه‌ای ANP ساختارمند کردن فرایند تصمیم‌گیری باتوجه‌به یک سناریو متأثر از فاکتورهای چندگانه مستقل از هم است. این تکنیک، فرایند روش تصمیم‌گیری تحلیل شبکه‌ای ANP را به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌وسیله جایگزینی شبکه به‌جای سلسله‌مراتب بهبود می‌بخشد. یک مسئله پیچیده را می‌توان به چند مسئله فرعی متشکل از سطوح سلسله‌مراتبی به‌گونه‌ای تجزیه کرد که هر سطح در بر گیرنده مجموعه‌ای از معیارها و گزینه‌های مربوط به هر مسئله فرعی باشد. آخرین سطح شامل گزینه‌ها یا فعالیت‌هایی است که برای رسیدن به هدف باید به آنها توجه کرد. مراحل رویکرد گام‌به‌گام شامل؛ مرحله اول: مقایسه زوجی معیارها باتوجه‌به هدف مسئله، مرحله دوم: مقایسه زوجی بین معیارها باتوجه‌به هر معیار، مرحله سوم: مقایسه زوجی بین گزینه‌ها باتوجه‌به معیارها، مرحله چهارم: مقایسه زوجی بین گزینه‌ها نسبت به گزینه‌ها و مرحله پنجم: تعیین ارجحیت گزینه‌ها است (داس و چاکرابورتی، ۲۰۱۱) به دلیل عدم توانایی رویکرد AHP در لحاظ کردن وابستگی‌های شاخص‌ها و گزینه‌ها، آل ساعتی در سال ۱۹۹۶ رویکرد فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) را معرفی کرد. مزیت این روش در مقایسه با AHP این است که عناصر مؤثر در تصمیم‌گیری را نیز در نظر می‌گیرد. فرایند AHP اجزای یک سیستم را به‌صورت یک سلسله‌مراتب سازماندهی می‌کند. به‌طوری که هر عنصر سلسله‌مراتبی می‌تواند به عنصر سطح بالاتر خود وابسته باشد و به‌صورت خطی این وابستگی تا بالاترین سطح می‌تواند ادامه داشته باشد؛ به عبارت دیگر در یک سلسله‌مراتب، وابستگی‌ها باید به‌صورت خطی (از بالا به پایین و یا برعکس) باشد. چنانچه وابستگی دوطرفه باشد، یعنی وزن شاخص‌ها به وزن

گزینه‌ها و وزن گزینه‌ها نیز به شاخص‌ها وابسته باشد، مسئله از حالت سلسله‌مراتبی خارج شده و تشکیل یک شبکه یا سیستم غیرخطی یا سیستم بازخورد را می‌دهد. در این حالت برای محاسبه وزن عناصر از رویکرد ANP استفاده می‌شود. روش ANP قادر است همبستگی‌ها و بازخوردهای موجود بین عناصر مؤثر در تصمیم‌گیری را مدل‌سازی کرده و تمامی تأثیرات درونی اجزای مؤثر در تصمیم‌گیری را محاسبه کند. در حقیقت روش ANP می‌تواند به‌عنوان ابزاری سودمند در مسائلی که تعامل بین عناصر سیستم تشکیل ساختار شبکه‌ای می‌دهد به کار گرفته شود. این روش بر اساس نتایج حاصل از محاسبات وزنی– نسبی به وجود آمده که در مشخص نمودن و اختصاص‌دادن منابع بر اساس اولویت‌های وزنی– نسبی مورداستفاده قرار می‌گیرد. روش تحلیل شبکه با استفاده از شبکه‌ای از معیارها، گزینه‌ها و گروه‌های درون خوشه‌ها، عملیات مدل‌سازی مسائل و مشکلات را انجام می‌دهد. در این روش تمام عناصر موجود در شبکه قادر هستند به هر طریقی با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و شبکه قادر است بازخوردها و وابستگی بین و درون خوشه‌ها را با هم ترکیب کند. روش تحلیل شبکه قادر است به‌عنوان یک کنترل سلسله‌مراتبی ایجاد شود. در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های روش ANP از نرم‌افزار Super Decisions طراحی شده توسط ساعتی و همکاران (۲۰۰۶) استفاده گردید. مراحل روش ANP به شرح ذیل است:

مرحله اول: تعیین ساختار شبکه‌ای مسئله تصمیم‌گیری

در این مرحله هدف اصلی ارائه تعریفی روشن از مسئله و تبدیل آن به یک ساختار شبکه‌ای مرتبط است. درخت سلسله‌مراتبی شامل هدف، شاخص‌ها و گزینه‌ها می‌باشد که به هر کدام از اجزای درخت سلسله‌مراتب، خوشه گفته می‌شود و هر کدام از این خوشه‌ها از عناصری تشکیل شده‌اند. در واقع یک شبکه تصمیم‌گیری از مجموعه‌ای از خوشه‌ها، عناصر و ارتباطات میان آنها تشکیل می‌شود.

مرحله دوم: مقایسه زوجی معیارها

این مرحله همانند روش AHP بوده و در این پژوهش همانند روش AHP عمل گردید و معیارها با یکدیگر مقایسه گردید.

مرحله سوم: محاسبه وزن نهایی

برای محاسبه وزن شاخص‌ها از دو روش استفاده می‌شود. روش گام‌به‌گام و روش سوپرماتریس در روش گام‌به‌گام باتوجه‌به اینکه وزن شاخص‌ها در دو ماتریس جداگانه شامل ماتریس وزن شاخص‌ها نسبت به هدف (W_{21}) و ماتریس وزن شاخص‌ها نسبت به شاخص‌های دیگر (W_{22}) محاسبه می‌شود، جهت تعیین وزن شاخص‌ها باید این دو ماتریس را ترکیب کرد که از رابطه (۳) استفاده می‌گردد. سپس وزن گزینه‌ها با رابطه (۴) محاسبه می‌شود و در نهایت وزن نهایی با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$W_2 = W_{21} * W_{22} \quad (۳)$$

$$W_3 = W_{31} * W_{32} \quad (۴)$$

$$W = W_3 * W_{32} * W_1 \quad (۵)$$

در رابطه ۵ W_1: میزان اهمیت هدف است که در بیشتر مسائل تصمیم‌گیری برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

روش دوم روش سوپر ماتریس است. یک سوپرماتریس در حقیقت یک ماتریس جزء بندی شده است که در آن هر بخش از ماتریس، رابطه بین دو سطح تصمیم‌گیری را در کل مسئله تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. رابطه (۶) سوپرماتریس استاندار ارائه شده توسط ساعتی و وارگاس[۱] (۲۰۰۶) را نشان می‌دهد. در این سوپر ماتریس C بیانگر خوشه‌ها و e عناصر درون گروه‌ها است. بردارهای W درون ماتریس نیز بردارهای وزنی حاصل از مقایسات زوجی عناصر خوشه‌ها با یکدیگر است. تمام روابط و تعاملات بین عناصر سطوح تصمیم‌گیری به‌وسیله مقایسات زوجی در روش سوپرماتریس ارزشیابی می‌شود.

$$W=\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & . & . & . & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & . & . & . & W_{12N} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ W_{N1} & W_{N2} & . & . & . & W_{NN} \end{bmatrix} \qquad (٦)$$

مرحله چهارم: تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی

بعد از محاسبه وزن هر شاخص لایه مربوطه تهیه و با تلفیق لایه‌ها نقشه نهایی سیل‌خیزی برای تمام حوضه‌ها تهیه گردید.

یافته‌های پژوهش

در مرحله اول، پرسش‌نامه مقایسه زوجی عوامل و فاکتورهای مؤثر بر پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند در اختیار ۱۰ نفر از متخصصان ژئومورفولوژی کارست قرار گرفت. بعد از انجام مرحله مقایسه زوجی پارامترها با یکدیگر، وزن‌های مربوطه وارد نرم‌افزار اکسپرت چویس (Expert Choice) گردید و وزن هر یک از معیارها مشخص گردید و در جداول مربوطه قرار داده شد و وزن نهایی لایه‌ها اعمال گردید. سپس نمودار مربوطه ترسیم شد (جدول ۲ و جدول ۳) (شکل ۲).

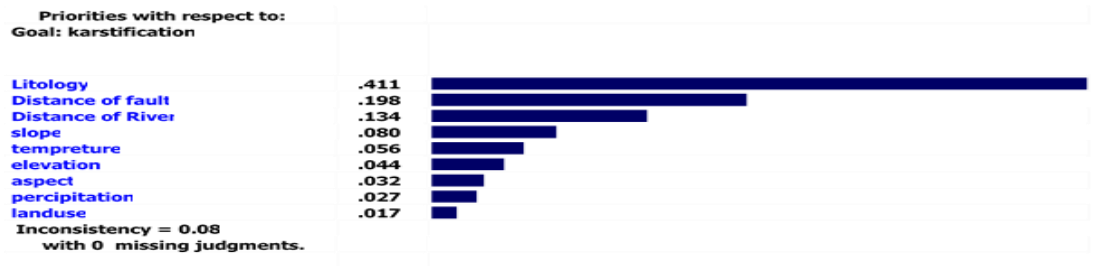
[۱] Saaty and Vargas.

جدول ۲: پرسش‌نامه وزن دهی عوامل مؤثر بر پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند

ردیف	نام	لیتولوژی	فاصله از گسل	فاصله از آبراهه	شیب	جهت شیب	ارتفاع	بارش	دما	کاربری اراضی
۱	لیتولوژی	۱	۵	۶	۷	۹	۷	۶	۸	۹
۲	فاصله از گسل		۱	۲	۴	۶	۵	۶	۷	۸
۳	فاصله از آبراهه			۱	۳	۵	۴	۴	۵	۵
٤	شیب				۱	۳	۴	۲	۳	۵
٥	جهت شیب					۱	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۳
٦	ارتفاع						۱	۱/۲	۲	۴
۷	بارش							۱	۳	۵
۸	دما								۱	۳
۹	کاربری اراضی									۱

جدول ۳: وزن لایه‌های اطلاعاتی به روش AHP و اعمال نظر کارشناسی در منطقه موردمطالعه

نام لایه	وزن نهایی
لیتولوژی	./۴۱
فاصله از گسل	./۱۹
فاصله از رودخانه	./۱۳
شیب	./۸۰
بارش	./۵۶
ارتفاع	./۴۴
دما	./۳۲
جهت شیب	./۲۷
کاربری اراضی	./۱۷
جمع	**۱**



شکل ۳: نمودار ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست طبق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

نتایج روش ANP

طبق محاسبات صورت‌گرفته در نرم‌افزار Super Decisions، معیار لیتولوژی با وزن ۰/۲۰ با اهمیت‌ترین و معیار بارش با وزن ۰/۰۴۴ کم اهمیت‌ترین معیار شناخته شد (جدول ۴).

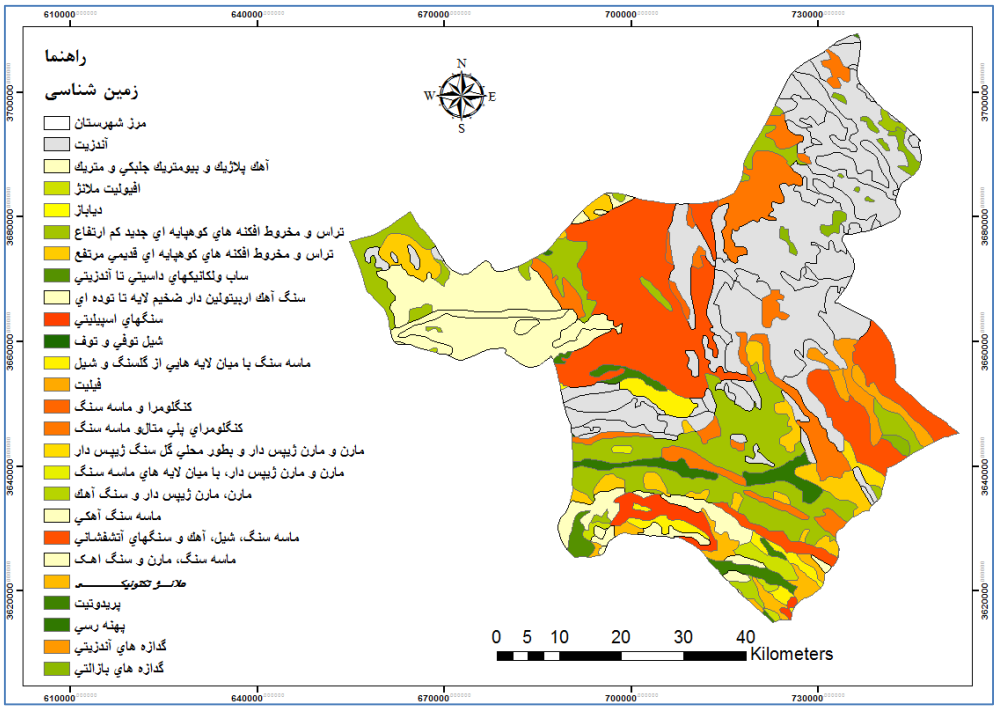
جدول ٤: وزن لایه‌های اطلاعاتی به روش ANP و اعمال نظر کارشناسی در منطقه موردمطالعه

نام لایه	وزن نهایی
لیتولوژی	/۲۰
فاصله از گسل	/۱۹
فاصله از رودخانه	/۱۲
شیب	/.۷۷
بارش	/.۴۴
ارتفاع	/۱۰
دما	/۱۰
جهت شیب	/.۴۸
کاربری اراضی	/۱۲
جمع	**۱**

پارامترهای مؤثر در پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند

لیتولوژی

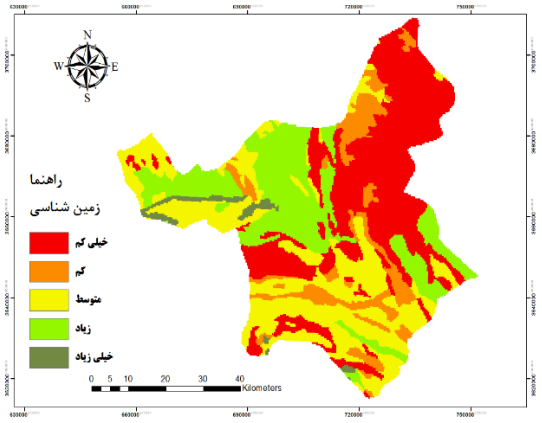
واحدهای زمین‌شناسی منطقه باتوجه‌به خواص هیدرولیکی، مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار گرفتند؛ بنابراین به سازندهای آهکی بالاترین امتیاز و به سازندهای غیر آهکی باتوجه‌به جنس امتیازات کمتری داده شد (واعظی هیر و همکاران،۱۴۰۳). به دلیل تأثیرگذاری زیاد نوع سازند بر نفوذ آب در سازندهای مختلف این پارامتر مدنظر است (دشتی برمکی و همکاران،۱۳۹۴). (شکل ۳) هر چه کارست خلوص بالاتری داشته باشند توسعه کارست بالاتر (زنگنه تبار و محمد خان،۱۴۰۳). منطقه موردمطالعه در بخشی از فلات ایران در زیر ناحیه نهبندان – خاش یا فلیش قرار دارد. در نتیجه تحولات زمین ساختی در این منطقه، انواع رخساره‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی دوران دوم و سوم زمین‌شناسی گسترش‌یافته است. مجموعه سنگ‌های کوهستان باقران در جنوب شهر بیرجند به‌عنوان یک مجموعه آمیزه رنگین معرفی شده است. قدیمی‌ترین رخنمون‌های این واحدها به دوره پرمین مربوط به سنگ‌های پریدوتیت و وسیع‌ترین گسترش رخنمون‌ها متعلق به رسوبات سطح پایین مخروطه افکنه و رسوبات تراس‌های دره با ۵۷۴٫۸ کیلومترمربع و توف آندزیتی داسیتی با ۵۲۲٫۶ کیلومترمربع است. سازندهای آهکی عمده منطقه موردمطالعه، آهک نومولیتی، سنگ‌آهک، آهک پلاژیک و رسوبات فلیش از نوع آهک می‌باشد که در شمال غربی و جنوب منطقه موردمطالعه گسترش دارد. در منطقه موردمطالعه در مجموع ۳۶ واحد سنگی وجود دارد که بر روی نقشه زمین‌شناسی (شکل ۴) قرار دارند. وجود سنگ‌های انحلال‌پذیر یکی شرایط اصلی در توسعه منابع آب کارست است. طبق طبقه‌بندی صورت‌گرفته در جدول اطلاعات توصیفی، آهک نومولیتی، سنگ‌آهک و گل‌سنگ آهکی برای پتانسیل کارست زایی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است (شکل ۵).



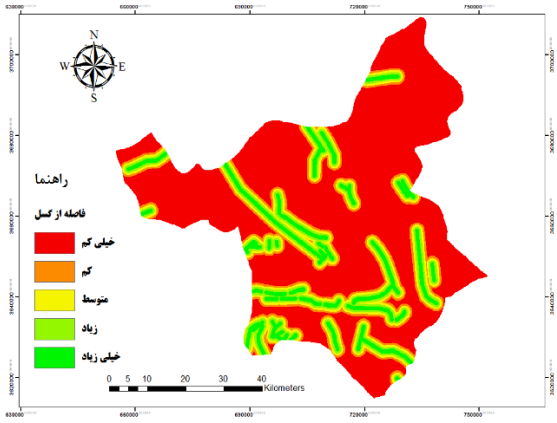
شکل ٤: نقشه زمین‌شناسی شهرستان بیرجند (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند)

فاصله از گسل: درز و شکاف‌ها مهم‌ترین عوامل نفوذ آب به داخل سنگ‌های کربناته محسوب می‌شوند (ویسی و همکاران،۱۴۰۱). فاصله از گسل رابطه معکوس با توسعه کارست دارد؛ زیرا در مناطق نزدیک گسل نفوذپذیری سنگ‌ها بیشتر بوده و کارست زایی بیشتر می‌شود (زنگنه تبار و محمدخان،۱۴۰۳) (شکل ۶). **بارش:** بارش تأثیر زیادی در حجم آب نفوذی به داخل زمین دارد. مناطق با بارش بیشتر آب بیشتری برای نفوذ در اختیار دارند (زنگنه تبار و قدیمی،۱۳۹۸). جهت وزن دهی بالاترین امتیاز به بارندگی بین ۳۰۰–۲۵۰ میلیمتر و کمترین امتیاز به مناطقی با بارش ۱۵۰–۱۰۰ میلیمتر اختصاص داده شد (شکل ۷). **دما:** دمای پایینتر شرایط مناسبتری بـرای انحلال دارد. با افزایش ارتفاع، دما کـاهش و بـارش افـزایش و عامـل مؤثر در انحلال است (جعفری و همکاران،۱۴۰۰) بنابراین مناطق با بارش بیشتر، امتیاز بالاتری در توسعه منابع آب کارست کسب کردند. (شکل ۸). **ارتفاع:** ارتفاع بالاتر، بارش بیشتر و اقلیم مرطوبتری دارد. پس توسعه کارست این مناطق نسبت به مناطق پست‌تر بیشتر می‌باشد (ویسی و همکاران،۱۴۰۱). با افزایش ارتفاع، تبخیر و تعرق پایین و به برف اجازه می‌دهد تا به تدریج ذوب و آبهای زیرزمینی را تغذیه کند (واعظی هیر و همکاران،۱۴۰۳). ارتفاع نقش زیادی در تغذیه و تخلیه و برونزد چشمه‌های کارستی در یک محدوده دارد (زروش و همکاران، ۱۳۹۳) بنابراین مناطق با ارتفاع بیشتر امتیاز بالاتری جهت توسعه منابع آب کارست کسب کردند. (شکل ۹). **شیب:** در مناطق پرشیب‌تر، امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد و نیز رویش گیاه فراهم نیست. پس آب باران به سرعت جاری و فرصت نفوذ ندارد (زنگنه تبار و قدیمی،۱۳۹۸). در مناطق کم شیبتر رواناب فرصت بیشتری جهت تماس با محیط و نفوذ دارد، (پوراکبری و همکاران،۱۳۹۹) بنابراین هر چه شیب کمتر، پتانسیل بالاتر و امتیاز بیشتری جهت توسعه منابع آب کارست کسب نمود

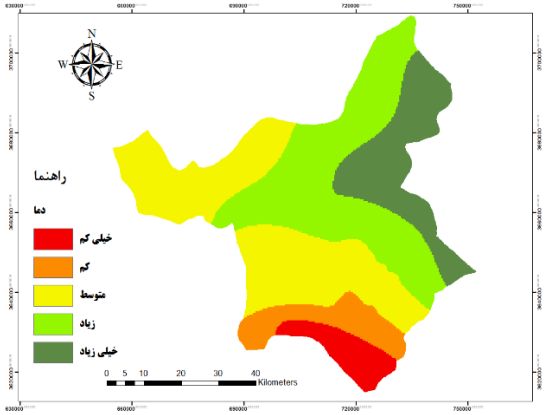
(شکل ۱۰). **فاصله از آبراهه:** هرچه فاصله از آبراهه کمتر توسعه کارست بیشتر وبالعکس (رضائی عارفی و همکاران،۱۳۹۹) (شکل ۱۱). در لایه فاصله از آبراهه تا ۵۰۰ متر بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و فاصله بیشتر از ۲۰۰۰۰۰ متر کمترین وزن را به خود اختصاص داد (شکل ۱۱). **جهت شیب:** در شیب شمالی به دلیل نور کمتر، تبخیر کمتر و برفها دیرتر ذوب و فرصت کافی برای نفوذ دارد. پس جهات شمالی آب بیشتری برای توسعه کارست دارند (زنگنه تبار و قدیمی،۱۴۰۳). مناطق با جهت‌های شمالی، شرقی و شمال شرقی به دلیل تبخیر کمتر و ماندگاری بیشتر برف بیشترین امتیاز را به خود اختصاص دادند و بهترین جهت‌ها به‌منظور توسعه یافتگی منابع آب کارست هستند (رضائی عارفی و همکاران،۱۴۰۳). کمترین امتیاز به جهت‌های جنوبی، جنوب شرقی و جنوب غربی داده شد زیرا در این جهت‌ها، تبخیر بیشتر، نور آفتاب بیشتر و ماندگاری برف کمتر می‌باشد (شکل ۱۲). **کاربری اراضی:** پوشش گیاهی سطح کارست اگر متراکم باشد در انحلال نقش مهمی دارد (نخعی و همکاران،۱۴۰۲). پوشش گیاهی سبب افزایش درز و شکاف در سازند سخت شده و نفوذ را افزایش می‌دهد (بهنیافر و قنبرزاده،۱۳۹۵). بیشترین وزن به جنگلها داده شد؛ زیرا فشار ریشه گیاه در این مناطق سبب تخریب سنگها شده که باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود (پوراکبری و همکاران،۱۳۹۹). (شکل ۱۳).



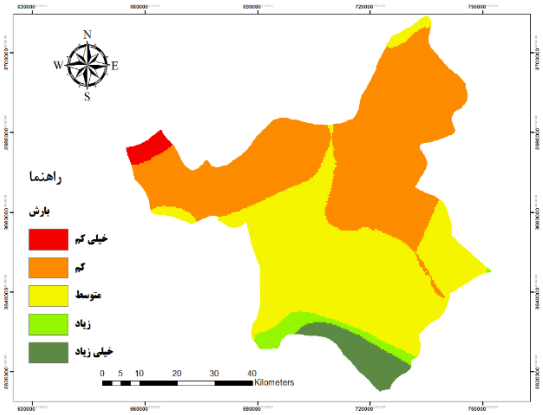
شکل ۵: نقشه رستری زمین‌شناسی شهرستان بیرجند



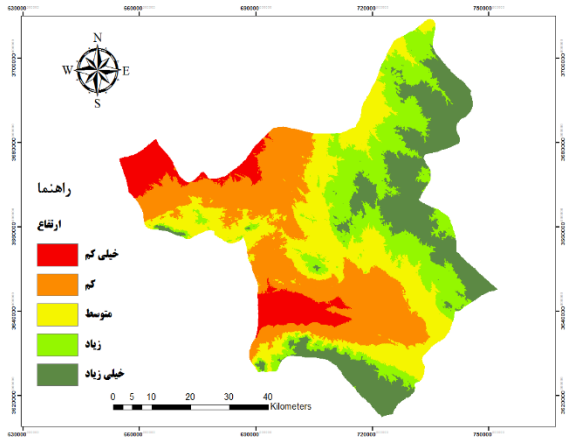
شکل ٦: نقشه رستری فاصله از گسل شهرستان بیرجند



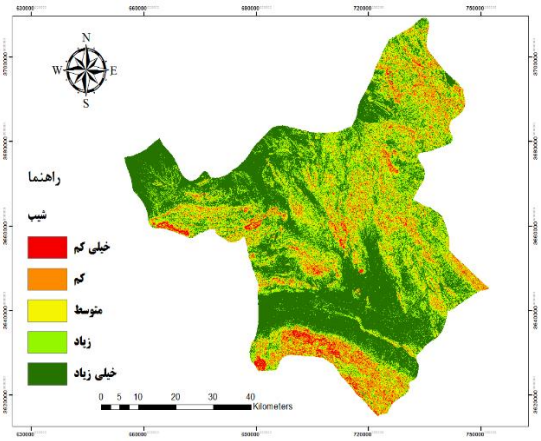
شکل ۷: نقشه رستری هم بارش شهرستان بیرجند



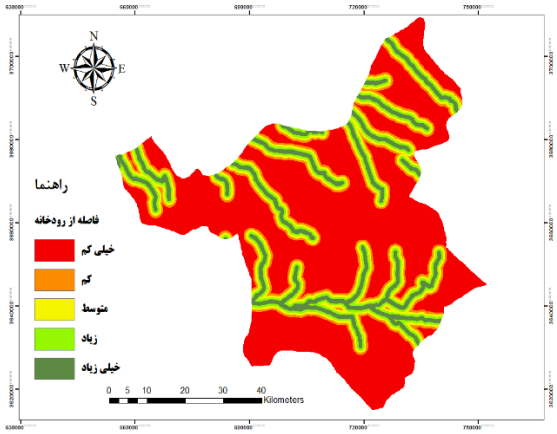
شکل ۸: نقشه رستری هم دما شهرستان بیرجند



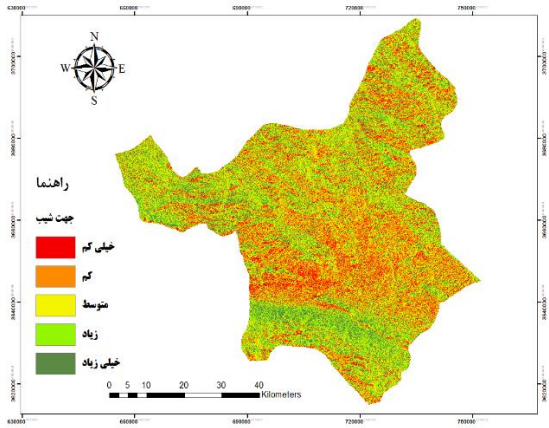
شکل ۹: نقشه رستری ارتفاع شهرستان بیرجند



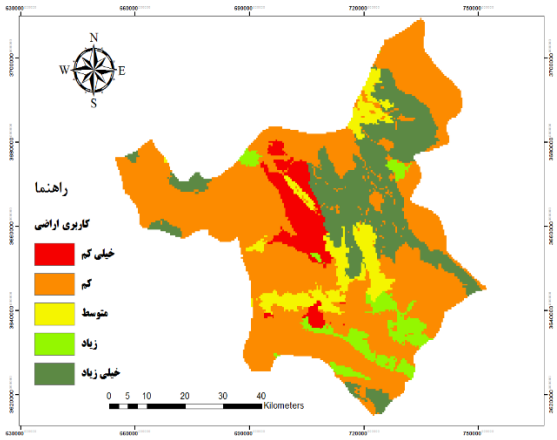
شکل ۱۰: نقشه رستری شیب شهرستان بیرجند



شکل ۱۱: نقشه رستری فاصله از آبراهه شهرستان بیرجند



شکل ۱۲: نقشه رستری جهت شیب شهرستان بیرجند

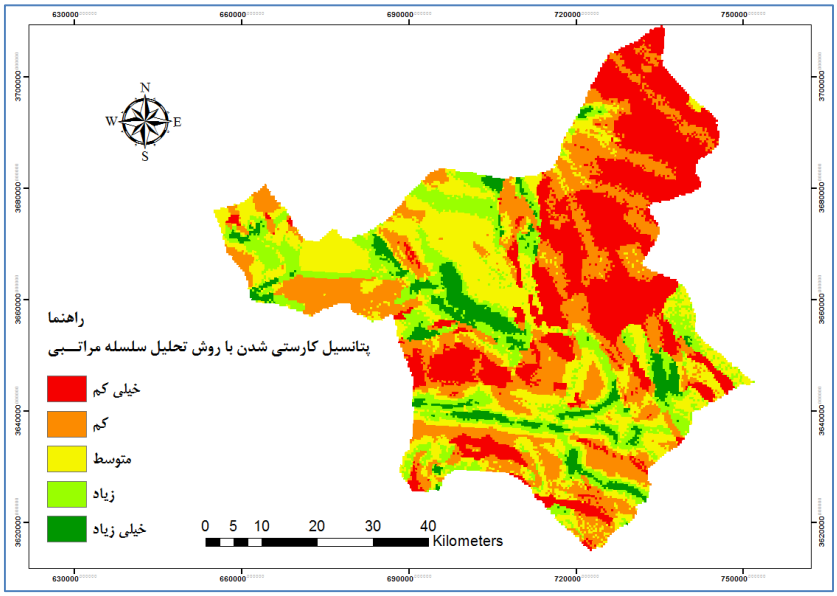


شکل ۱۳: نقشه رستری کاربری اراضی شهرستان بیرجند

پتانسیل سنجی منابع آب کارست با روش تحلیل سلسله‌مراتبی

نقشه نهایی پتانسیل سنجی منابع آب کارست با استفاده از لایه‌های رستری لیتولوژی، فاصله از گسل، دما، بارندگی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع و فاصله از آبراهه با ترکیب وزن‌های به دست آمده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی با هر لایه و همپوشانی آنها با استفاده از دستور Raster Calculator دست آمد. نقشه نهایی حاصل از پتانسیل‌یابی منابع آب

کارست در محدوده موردمطالعه به پنج‌طبقه: پتانسیل خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد. شکل شماره ۱۴ نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب کارست و جدول شماره ۵ مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش AHP را نشان می‌دهد که از کل مساحت شهرستان بیرجند، ۲۶/۴۰ درصد در طبقه خیلی کم‌توسعه یافته، ۲۷/۵۸ درصد در طبقه کم‌توسعه یافته، ۲۳/۸۶ درصد در طبقه متوسط، ۱۵/۷۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۶/۴۰ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد که در مناطق جنوبی و شمال غربی محدوده موردمطالعه قرار گرفته است؛ بنابراین از کل مساحت شهرستان بیرجند ۲۲/۱۵ درصد در طبقه زیاد و خیلی زیاد از نظر توسعه کارست را دارا هستند؛ بنابراین پارامتر لیتولوژی با ارزش ۰/۴۱ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل کننده پتانسیل توسعه منابع آب کارست در منطقه موردمطالعه بوده است و عامل کاربری اراضی با ارزش ۰/۰۱۷ کمترین وزن را به خود اختصاص داده است که کمترین تأثیر را در کارست زایی کنونی حوضه به خود اختصاص داده است. نتایج نشانگر آن است که به ترتیب عوامل زمین‌شناسی، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی کارست در محدوده موردمطالعه داشته‌اند.



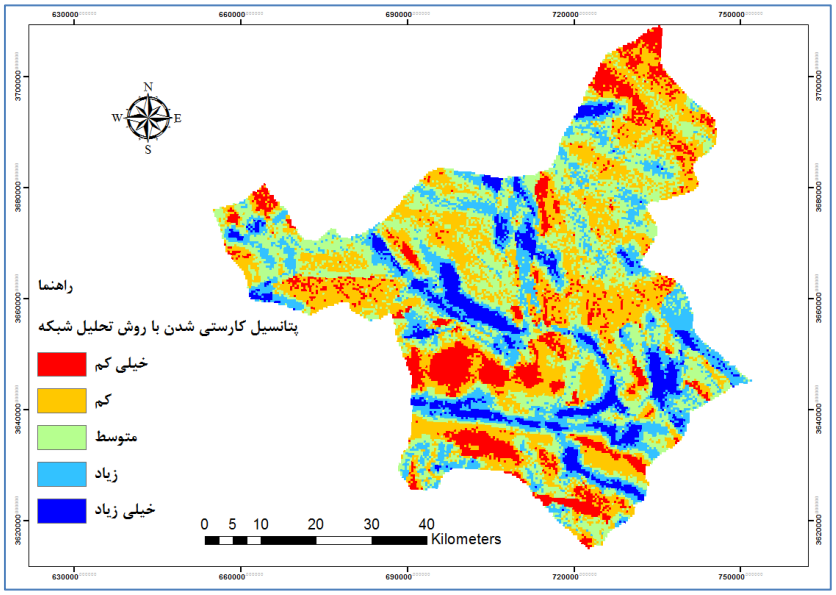
شکل ۱۴: نقشه پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند با روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP

جدول ۵: مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش AHP

ردیف	طبقه	مساحت به کیلومترمربع	درصد مساحت طبقات
۱	خیلی کم	۱۰۴۳	۲۶/۴۰
۲	کم	۱۰۸۹	۲۷/۵۸
۳	متوسط	۹۴۲	۲۳/۸۶
٤	زیاد	۶۲۲	۱۵/۷۵
۵	خیلی زیاد	۲۵۳	۶/۴۰

نقشه نهایی پتانسیل سنجی منابع آب کارست با روش ANP

نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب کارست با استفاده از لایه‌های رستری لیتولوژی، فاصله از گسل، دما، بارندگی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع و فاصله از آبراهه با ترکیب وزن‌های به دست آمده از روش تحلیل شبکه با هر لایه و همپوشانی آنها با استفاده از دستور Raster Calculator دست آمد. بر اساس اصول مبانی کارست و مشاهدات میدانی، نقشه نهایی حاصل از پتانسیل‌یابی منابع آب کارست در محدوده موردمطالعه به پنج‌طبقه: پتانسیل خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد. شکل شماره ۱۵ نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب کارست و جدول شماره ۶ مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش تحلیل سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد که از کل مساحت شهرستان بیرجند، ۱۱/۷۵ درصد در طبقه خیلی کم‌توسعه یافته، ۳۲/۲۸ درصد در طبقه کم‌توسعه یافته، ۲۹ درصد در طبقه متوسط، ۱۸/۸۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۸ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است که در مناطق جنوبی و شمال غربی محدوده موردمطالعه قرار گرفته است؛ بنابراین از کل مساحت شهرستان بیرجند ۲۶/۸۵ درصد در طبقه زیاد و خیلی زیاد از نظر توسعه کارست را دارا هستند. از این‌رو عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰/۲۰ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل کننده پتانسیل توسعه منابع آب کارست در منطقه موردمطالعه بوده است و عامل بارش با ارزش ۰/۰۴۴ کمترین وزن را به خود اختصاص داده است که کمترین تأثیر را در کارست زایی کنونی حوضه به خود اختصاص داده است. نتایج نشانگر آن است که عوامل زمین‌شناسی و فاصله از گسل مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی کارست در محدوده موردمطالعه داشته‌اند.



شکل ۱۵: نقشه پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند با روش تحلیل شبکه

جدول ٦: مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش ANP

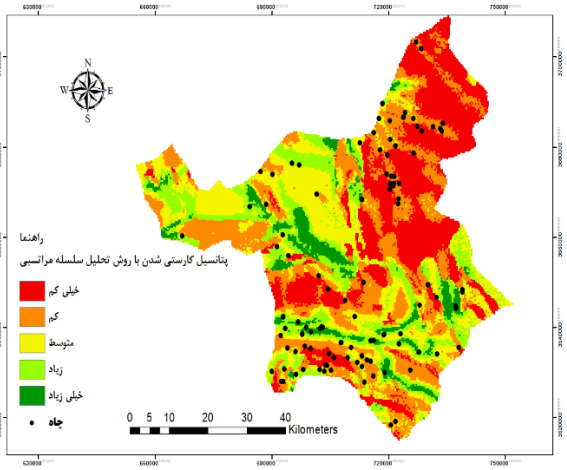
ردیف	طبقه	مساحت به کیلومترمربع	درصد مساحت طبقات
۱	خیلی کم	۴۶۵	۱۱,۷۵
۲	کم	۱۲۷۷	۳۲,۲۸
۳	متوسط	۱۱۴۸	۲۹
٤	زیاد	۷۴۶	۱۸,۸۵
٥	خیلی زیاد	۳۲۰	۸

صحت سنجی و اعتبارسنجی نقشه پتانسیل سنجی منابع آب کارست با لایه چاه‌ها و قنات‌ها در روش AHP

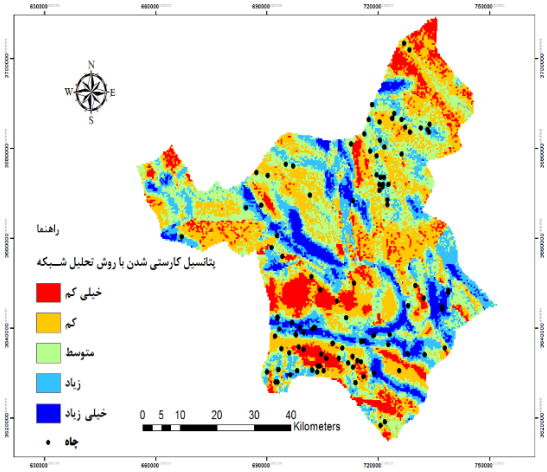
پس از انجام هر پروژه، پهنه‌بندی لازم است که نتایج به دست آمده باتوجه‌به واقعیت‌ها و اطلاعات موجود پیرامون آنها، مورد بررسی قرار گیرد (دشتی برمکی،۱۳۹۴). جهت صحت سنجی نقشه نهایی، لایه پوینت چاه‌ها و قنات‌های شهرستان بیرجند بر روی نقشه نهایی فراخوانی گردید. لایه چاه‌ها و چشمه‌ها بر روی مناطق کارست قرار گرفتند ولی با روش بصری مشخص گردید تعداد کمتری چاه و چشمه بر روی این مناطق به نسبت روش تحلیل شبکه قرار گرفته‌اند (شکل ۱۶).

صحت سنجی و اعتبارسنجی نقشه پتانسیل سنجی منابع آب کارست با لایه چاه‌ها و چشمه‌ها در روش ANP

جهت صحت سنجی نقشه نهایی، لایه پوینت چاه‌ها و قنات‌های شهرستان بیرجند بر روی نقشه نهایی فراخوانی گردید و با دید بصری مشخص گردید که لایه چاه‌ها و چشمه‌ها تعداد بیشتری را بر روی مناطق توسعه کارست خیلی زیاد و زیاد به خود اختصاص داده‌اند. این امر نشان‌دهنده کارایی بیشتر روش ANP نسبت به AHP است (شکل ۱۷). نکته مهم و کاربردی در این قسمت شناسایی منابع آب کارست در قالب نقشه معیار و سپس مرحله اکتشاف ژئوفیزیکی این مناطق می‌باشد که در شکل شماره ۱۲ به‌صورت سبز پررنگ و کم رنگ آمده است. این نقشه می‌تواند مورد استفاده سازمان آب منطقه‌ای خراسان جنوبی در مرحله اکتشاف قرار گیرد.



شکل ۱۶(سمت راست): تلفیق و اعتبارسنجی لایه آبخوانهای شهرستان بیرجند و لایه پتانسیل کارستی شدن در محدوده موردمطالعه در روش AHP



شکل ۱۷(سمت چپ) تلفیق و اعتبارسنجی لایه آبخوانهای شهرستان بیرجند و لایه پتانسیل کارستی شدن در محدوده موردمطالعه در روش ANP

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی با استفاده از روش‌های AHP و ANP است. بر اساس اصول مبانی کارست و مشاهدات میدانی و یافته‌های دیگر، ۹ پارامتر به‌عنوان عوامل مؤثر بر توسعه کارست در منطقه موردمطالعه در نظرگرفته شـد. نتایج حاصله نشان داد که در روش AHPاز کل مساحت شهرستان بیرجند، ۲۶/۴۰ درصد در طبقه خیلی کم‌توسعه یافته، ۲۷/۵۸ درصد در طبقه کم‌توسعه یافته، ۲۳/۸۶ درصد در طبقه متوسط، ۱۵/۷۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۶/۴۰ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است. در روش ANP از کل مساحت شهرستان بیرجند، ۱۱/۷۵ درصد در طبقه خیلی کم‌توسعه یافته، ۳۲/۲۸ درصد در طبقه کم‌توسعه یافته، ۲۹ درصد در طبقه متوسط، ۱۸/۸۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۸ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است؛ بنابراین نتایج تحقیق نشان داد که در کارایی دو مدل در اعتبارسنجی با لایه پوینت چاه و قنات، روش ANP از اعتبار بیشتر برخوردار است چون بعد از هم‌پوشانی دولایه، لایه پوینت چاه‌ها و قنات‌ها مساحت بیشتری از کارست توسعه‌یافته و خیلی توسعه‌یافته با استفاده از دید بصری را به خود اختصاص داد که با نتایج تحقیقات واعظی هیر و همکاران (۱۴۰۳)، مفیدی فر و همکاران (۱۳۹۴) و دشتی برمکی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. نتایج نشانگر آن است که عوامل لیتولوژی و فاصله از گسل مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی منابع آب کارست در این شهرستان داشته‌اند که با نتایج تحقیقات رضائی عارفی و همکاران (۱۴۰۳)، نخعی و همکاران (۱۴۰۲) و خضری و همکاران (۱۳۹۷) مشابهت دارد. باتوجه‌به تهیه نقشه‌های نهایی و اعتبارسنجی نقشه‌های مذکور به روش بصری، می‌بایست مدیران سازمان آب منطقه‌ای خراسان جنوبی اقدام به اکتشاف منابع آب جایگزین در مناطق مذکور نمایند. باتوجه‌به اینکه منابع آب شرب شهرستان از شهرستان سربیشه منتقل می‌گردد، پیشنهاد می‌گردد جهت جلوگیری از بحران منابع آب در آینده و افزایش کیفیت منابع آب، اکتشاف منابع آب کارست در مناطق جنوبی در ارتفاعات باقران و مناطق شمال غربی شهرستان صورت پذیرد. نکته مهم دیگر این است که پهنه بندی

یک سازند کارستی به محدوده‌های رده بندی شده با ارزشهای متفاوت، به این معنا نیست که به طور قطع در محدوده‌های دارای ارزش پتانسیلی بالا هرگونه حفاری چاه، توأم با موفقیت خواهد بود و یا بر عکس و این فقط درصد احتمالات و میزان شانس موفقیت در وجود منابع آبی را بیان می‌دارد. مشخص کردن بهترین منطقه‌ها برای انجام بررسی‌های دقیق‌تری همچون اکتشافات ژئوفیزیکی و سپس حفاریهای اکتشافی ضروری است.

منابع

۱- بهنیافر، ابوالفضل.، قنبرزاده.، هادی. (۱۳۹۵). ژئومورفولوژی‌کارست، مشهد، انتشارات نگاران سبز.

۲- پور اکبری، سجاد.، کلانتری، نصرا....، مصلح، آرش؛ و عقدکی، یاسر. (۱۳۹۵). پتانسیل‌یابی منابع آب کارستی با استفاده از GIS و RS و AHP (مطالعه موردی: تاقدیس‌های لیلی و کی نو در شمال شرق خوزستان)، مهندسی منابع آب ایران، سال ۱۳، شماره ۲، صص ۱۱۲-۹۹.

۳-خوش‌رفتار، رضا.، سرور، ج.، و فرید مجتهدی، نیما. (۱۳۹۵). بررسی اشکال کارستی در توده کوهستانی درفک-گیلان. فضای جغرافیایی، سال ۱۶، شماره ۵۳ صص، ۳۹-۵۶.

۴-خضری، سعید.، شهابی، هیمن و محمدی, سارا. (۱۳۹۷). ارزیابی و پهنه‌بندی تحول کارست حوضه آبریز غار سهولان مهاباد با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی, ۶(۱), ۲۱-,۳۹

۵-جعفری، غلامحسن و ناصری، فروزان. (۱۴۰۰). بررسی خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌های زاگرس در ارتباط با شرایط کارستی‌شدن. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی, ۳۲(۱), ۲۵-,۴۴

۶- دشتی برمکی، مجید.، رضائی، محسن.، و اشجاری، جواد. (۱۳۹۴). پتانسیل‌یابی منابع آب کارست کوههای دوان و شاپور بر اساس تصمیم‌گیری چندمعیاره، پژوهش آب ایران.، دوره ۹، شماره ۱، صص ۱۰۰-۸۹.

۷- رضایی عارفی، محسن.، معتمدی راد، محمد.، تقوی مقدم، ابراهیم.، و صادقی، منصور. (۱۴۰۳). پتانسیل‌یابی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، جغرافیای طبیعی لارستان، سال ۱۷، شماره ۶۴، صص،۳۸-۱۷.

۸- رضائی عارفی، محسن.، زنگنه اسدی، محمد علی، بهنیافر، ابوالفضل و جوانبخت، محمد. (۱۳۹۹). شناسایی درجه کارستی شدن حوضه کوهستانی کلات در شمال شرق ایران، فضای جغرافیایی، سال ۲۰، شماره ۷۱، صص ۷۴-۴۹.

۹- رضائی عارفی، محسن.، زنگنه اسدی، محمد علی.، بهنیافر، ابوالفضل.، و جوانبخت، محمد. (۱۳۹۹). پهنه بندی تحول کارست با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: حوضه کوهستانی کلات، خراسان رضوی)، جغرافیا، سال ۱۸، شماره ۶۴، صص ۹۴-,۷۹

۱۰- زنگنه تبار، ساسان.، و محمدخان، شیرین. (۱۴۰۳). مقایسه پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی در بخش‌هایی از زاگرس مرتفع و چین‌خورده مطالعه موردی: پرآو-بیستون و کبیرکوه .پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال ۱۳، شماره ۱، صص ۱۹۱-۱۷۶

۱۱- زنگنه‌تبار، ساسان.، و قدیمی، مهرنوش. (۱۳۹۸). بررسی پتانسیل منابع آبی کارست پرآو-بیستون به‌عنوان منابع تأمین آب پایدار اکوسیستم‌های زاگرس، اکوهیدرولوژی، سال ۶، شماره ۱، صص ۱۲۳-۱۱۱.

۱۲- زروش، ناهید.، واعظی، عبدالرضا.، و کریمی، حاجی. (۱۳۹۳). ارزیابی پتانسیل توسعه کارست در تاقدیس کبیر کوه استان ایلام با استفاده از تلفیق فازی و روش تحلیل سلسله‌مراتبیAHP و سنجش ازدور و GIS، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۳، شماره ۳، صص ۱۴۴-,۱۵۷

۱۳- معتمدی راد، محمد.، گلی مختاری، لیلا.، بهرامی، شهرام، و زنگنه اسدی، محمد علی. (۱۴۰۰). ارزیابی کیفیت منابع آبی از نظر شرب، کشاورزی و صنعت در آبخوان کارستی روئین اسفراین استان خراسان شمالی، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۲۱، شماره ۶۲، صص ۹۳-۷۴.

۱۴- مفیدی فر، مهدی.، اصلاح، مهدی.، حسن آبادی، علی. (۱۳۹۴). مقایسه مدل‌های تصمیم‌گیری تاپسیس و تحلیل سلسه‌مراتبی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه دشت یزد – اردکان در محیط GIS. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی, ۲۶(۱), ۱۴۹-۱۵۶.

۱۵- واعظی هیر، عبدالرضا.، خلخالی، مرضیه، و تبرمایه، مهری. (۱۴۰۳). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در واحدهای سازند سخت و کارستی استان آذربایجان غربی، آب و خاک, سال ۳۸، شماره ۳، صص ۳۵۰-,۳۳۷

۱۶- ویسی، عبدالکریم.، مقیمی، ابراهیم.، مقصودی، مهران.، یمانی، مجتبی، و حسینی، موسی. (۱۴۰۱). ارزیابی تحول‌یافتگی توده کارستی شاهو با استفاده از روش داده‌کاوی تعمیم‌یافته، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال ۱۱، شماره ۳، صص ۵۶-۳۹.

۱۷- نخعی، اعظم.، زنگنه اسدی، محمد علی.، بهنیافر، ابوالفضل، و گلی مختاری، لیلا. (۱۴۰۲). پهنه بندی توسعه کارست در حوضه آبریز بقمچ کشف رود با مدل منطق فازی ANP، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۱۱، شماره ۴، صص ۲۵۵-۲۳۰.

18- British Columbia, M., (2003). Karst Management Handbook For British Columbia.

19- 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): Pp 887- 898.

20- Jaiswal, R, K. Ghosh, N, C. Galkate, R, V. Thomas, T. 2015. Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) For Watershed Prioritization. International Conference In Water Resources, Coastal And Ocean Engineering (ICWECOE 2015). Pp 1553-1560

21- Das, S., Chakraborty, S., (2011). Selection Of Non-Traditional Machining Processes Using Analytic Network Process. Journal Of Manufacturing Systems, Vol.30 No.1, Pp: 41-53.

22- Ford, D.C., Williams, P.W., (2007). Karst Hydrogeology And Geomorphology, Wiley, Chichester, 562 Pp.

23- Hartmann A. Goldscheider, N.Wagener, T.Lange, J. Weiler, M., (2014). Karst Water Resources In A Changing World: Review Of Hydrological Modeling Approaches, American Geophysical Union (AGU) Reviews Of Geophysics, 10.1002/2013RG000443.

24-Malczewski,J(2019). Spatial Multicriteria Decision Analysis. 38 P. 10.4324/9780429436628-3

25- Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F., (2014). Application Of Probabilistic-Based Frequency Ratio Model In Groundwater Potential Mapping Using Remote Sensing Data And GIS. Arab. J. Geosci. 7(2): Pp 711–724

26- Pinto, D., Shrestha, S., Babel, M.S. *Et Al.* Delineation Of Groundwater Potential Zones In The Comoro Watershed, Timor Leste Using GIS, Remote Sensing And Analytic Hierarchy Process (AHP) Technique. *Appl Water Sci* **7**, Pp 503–519 (2017).

27- Saaty, T. L., (2016). The Analytic Hierarchy Process – Planning, Priority Setting, Resource Allocation. Mcgraw-Hill

28- Smith, J., Garcia, M., Brown, P., (2015). A Large-Scale Simulation Model To Assess Karstic Groundwater Recharge Over Europe And The Mediterranean**.** Journal Of Hydrology, **8** (3), Pp 1729–1745

29- Vargas, L, G. 2006 Decision Making With The Analytic Network Perocess Economic, Political, Social And Technological Applications With Benefits, Opportunities, Costs And Risks. Springer. Pp 282.

30- Waele, J., Gutierrez, F., Audra, P., (2015). Karst Geomorphology: From Hydrological Functioning To Palaeoenvironmental Reconstructions Geomorphology, Vol. 229, Pp. 1-2.

31-Yu, S., Ding, H., Zeng, Y., (2021**).** Evaluating Water-Yield Property Of Karst Aquifer Based On The AHP And CV. China University Of Mining & Technology.