صص ۳۸-۱۷

پتانسیل‌یابی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی

محسن رضایی عارفی*
استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
محمد معتمدی راد
استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
ابراهیم تقوی مقدم
استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
منصور صادقی
دکتری ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۲/۳ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۵/۳۱

چکیده

اکتشاف منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از راه‌های تأمین آب شرب در جهان با توجه به نیاز روزافزون جهانیان به آب، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. بحران آب در ایران و بخصوص در شهرهای گرم و خشک در حال حاضر به یک چالش جدی تبدیل شده است. شوری و درجه سختی آب بالا و کمبود آب شهرستان بیرجند راهکار منابع آب جایگزین را بیش از پیش به مسئولان مرتبط با منابع آب در آینده نزدیک گوشزد می‌کند. شناخت عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست در زمینه مطالعات مربوط به مدیریت سرزمین دارای جایگاه ویژه‌ای است. هدف از این پژوهش پتانسیل‌یابی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی با استفاده از مدل AHP می‌باشد. در این پژوهش با مدل تحلیل سلسله مراتبی، 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 در محیط نرم‌افزار ARC GIS10.3فراخوانی شدند. لایه‌های اطلاعاتی متفاوت با اعمال نظرات کارشناسی و مشاهدات میدانی به‌صورت نقشه‌های معیار طبقه‌بندی شدند. درنهایت با توجه به وزن به دست آمده، نقشه پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند به دست آمد. نتایج حاصله نشان داد که از کل مساحت شهرستان بیرجند، ۲۶/۴۰ درصد در طبقه خیلی کم توسعه‌یافته، ۲۷/۵۸ درصد در طبقه کم توسعه‌یافته، ۲۳/۸۶ درصد در طبقه متوسط، ۱۵/۷۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۶/۴۰ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است. از این‌رو، طبق قضاوت کارشناسان و متخصصان کارست ، عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰/۴۱ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل کننده پتانسیل توسعه منابع آب کارست در منطقه مورد مطالعه بوده است و عامل کاربری اراضی با ارزش ۰/۰۱۷ کمترین وزن را به خود اختصاص داده است. نتایج نشانگر آن است که به ترتیب عوامل لیتولوژی، فاصله از

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

گسل و فاصله از آبراهه مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی منابع آب کارست در این شهرستان داشته‌اند.

واژگان کلیدی: پتانسیل‌یابی، منابع آب کارست، مدل تحلیل سلسله مراتبی ، پهنه‌بندی کارست، شهرستان بیرجند

مقدمه

کارست به مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از آن‌ها در پوسته و سطح زمین گفته می‌شود که عمدتاً پدیده‌های ناشی از انحلال سنگ‌ها است و با تشکیل بازشدگی‌ها، تخریب و تجزیه ساختمان سنگ‌ها، ایجاد نوع ویژه‌ای از رژیم گردش آب، نوع خاص توپوگرافی منطقه و بالاخره تشکیل رژیم خاصی از شبکه زهکشی آشکار می‌گردد(میلانویچ[1]،۱۹۸۱). اصطلاح کارست برای توصیف نوع خاصی از چشم‌اندازها به کار می‌رود که دارای اشکال سطحی، غارها و سیستم‌های آب زیرزمینی هستند. این چشم‌اندازها و اشکال در سنگ‌های قابل‌حل مانند سنگ‌آهک، دولومیت، مرمر، ژیپس و نمک شکل می‌گیرند(فورد و ویلیامز[2]،۲۰۰۷:۱). کارست، ناحیه‌ای است که هیدرولوژی و مورفولوژی ویژه‌ای دارد که علت این ویژگی‌ها حلالیت بسیار زیاد در آن و توسعه تخلخل ثانویه و نقش عوامل تکتونیکی در توسعه آن است (وال و همکاران[3]،۲۰۱۵:۲). لند فرم‌های کارستی عمدتاً در مناطقی با سنگ‌بستر کربناتی قابل حل به‌وسیله انحلال شیمیایی آب با اسیدیته کم شکل می‌گیرند (پالمر[4]:۲۰۰۷:۴۵۴). از نظر ژئومورفولوژیست ها به مناطق شگفت‌انگیز تشکیل‌شده در سنگ‌های کربناته، دولومیته و تبخیری در هر ناحیه، پدیده‌های کارستی یا مجموعه زمین شکل‌های کارست حقیقی می‌گویند(لامورکس[5]، ۲۰۰۷:۵۱). عوامل و فرآیندهای مختلفی، تکامل کارست را تحت تأثیر قرار می‌دهند، توپوگرافی، لیتولوژی و ویژگی‌های زمین‌ساختی به‌عنوان عوامل منفعل عمل می‌کنند و فرآیندهای دیگری مانند: تکتونیک فعال، فرآیندهای هیدرولوژیکی وابسته به اقلیم، انحلال زیستی وابسته به محیط‌زیست و فرآیندهای ژئومورفولوژی، هوازدگی، شیب، آبراهه‌ها و یخبندان به‌طور فعال در توسعه اشکال کارست نقش دارند(کالیک[6]،۲۰۱۱:۳۲). به‌منظور توسعه منابع کارستیک عوامل زیادی مؤثر هستند، روی همرفته ۸ عنصر لازم برای ایجاد و توسعه کارست، شرایط اقلیمی، توپوگرافی، سنگ‌شناسی، ستبرای لایه‌های کربناته، کربن، دمای پایین، فشار و موقعیت زمین‌ساخت هستند(وایت، ۱۹۸۸). مناطق کارستی، اهمیت زیادی از دیدگاه‌های علمی، محیطی و کاربردی دارند. به‌طوری که حدود ۲۰ درصد از مساحت خشکی‌های جهان را سنگ‌های کارستی پوشانده‌اند و هرگونه توسعه بر روی این اراضی، مستلزم شناخت کامل از ژئومورفولوژی کارست است(بهنیافر و قنبر زاده، ۱۳۹۵: ۱۶). در سال ۲۰۱۳ میلادی ۲۹درصد از جمعیت جهان از منابع آب کارست استفاده می‌کردند(فورد و ویلیامز،۲۰۱۰،۵۷۸). در کشور ما حدود ۱۳ درصد مساحت آن را سازندهای کربناته تشکیل

---

[1]- Milanovic
[2] - Ford and williams
[3] - Waele et al
[4] - Palmer
[5] - Lamoreaux
[6] -Calic

می‌دهند که ۹۰ درصد آن در ارتفاعات زاگرس واقع شده است و در تأمین آب شرب کشور نقش بسیار مهمی دارند(بهنیافر و قنبر زاده، ۱۳۹۵: ۱۶). در مناطق خشک با توجه به اینکه کارست‌ها مناطق مناسبی برای ذخیره سفره‌های آب شیرین محسوب می‌شوند، شناسایی آن‌ها اهمیت دوچندانی می‌یابد(مکرم و نگهبان،۱۳۹۸). منابع آبی توده‌های کارست کوهستانی اهمیت زیادی برای آب شرب شهرها و سکونت‌گاه‌ها دارند و از این نظر شناسایی توده‌های کربناته کارست ساز برای مجریان برنامه‌ریزی آمایش سرزمین بسیار ضروری است. در منطقه تحت مطالعه که اقلیم آن از نوع گرم و خشک است میانگین درجه حرارت منطقه مورد مطالعه ۱۶٫۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی ۵۰ ساله در محل ایستگاه سینوپتیک شهر بیرجند ۱۷۷ میلی‌متر است(ربیعی، ۱۳۹۵). فعالیت‌های تکتونیزه در سازندهای کربناته شدید بوده است و توده‌های کارستی را در منطقه مورد مطالعه به وجود آورده است. تاکنون تحقیقات تخصصی در زمینه کارست شهرستان بیرجند صورت نگرفته است. فقط به‌صورت اندک در شرق شهرستان در منطقه آهنگران تحقیقات اندکی بر روی کارست منطقه صورت گرفته است که در زمینه ژئوتوریسم و اشکال کارستی بوده است. در نتیجه بررسی و کسب شناخت هر چه بیشتر پتانسیل‌های موجود در منطقه هم به لحاظ علمی و هم از نظر اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. این مورد به‌ویژه در دو زمینه ایجاد پتانسیل‌های آبی کارست‌های شهرستان به دلیل بحران آب در استان خراسان جنوبی و پتانسیل اکوتوریستی در مجاورت شهر بیرجند مورد توجه بیشتر است. با توجه به بحران آب در شهرستان بیرجند و بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع آب‌خانه‌های آبرفتی موجود، شناخت و بهره‌برداری از منابع جدید یکی از اولویت‌های تأمین آب در منطقه است که کارست‌ها برای این منظور بسیار مهم‌اند. در ایـران پهنه‌بندی اشکال کارستی را محققان مختلفی بررسی کرده‌اند. دشتی برمکی و همکاران در سال ۱۳۹۴ در پژوهشی با عنوان پتانسیل‌یابی منابع آب کارست کوه‌های دوان و شاپور بر اساس تصمیم‌گیری چندمعیاره به این نتیجه رسیدند که پتانسیل آب کارست دشتک شمالی بیش از جنوبی است. هماهنگی نواحی با پتانسیل بالا با چشمه‌های با آبدهی زیاد نشان می‌دهد که مدل ارائه شده می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای منطقه‌های کارستی استفاده شود. مزیدی و همکاران در سال ۱۳۹۵ در مقاله‌ای با عنوان پتانسیل‌یابی توسعه کارست با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه دشت سوسن و دشت ایذه) به این نتیجه رسیدند که تلفیق لایه‌های موجود نشان داد که مناطق مستعد به کارستی شدن با مساحت تقریباً ۳۲ درصد در جنوب، شرق، غرب و بخش‌هایی از شمال شرق منطقه واقع‌شده‌اند. واحد آهک آسماری، گچساران و ایلام ـ سروک شامل این بخش می‌باشند که از رسوبات کاملاً آهکی تشکیل‌شده‌اند و ازنظر تأمین آب مهم‌ترین سفره‌های آبدار کارستی در منطقه مطالعاتی محسوب می‌شوند. وجود اشکال سطحی کارست از قبیل کارن، ریل کارن و درز و شکاف‌ها در سازندهای مزبور نقش مؤثری در پراکندگی چشمه‌ها و آبدهی آن‌ها و کارستی شدن منطقه دارد. هم‌چنین قسمت‌های مرکز و بخش‌هایی از شمال شرق محدوده مطالعاتی با مساحت ۵۰ درصد از پتانسیل بسیار کمی جهت کارستی شدن برخوردار است.

واعظی و همکاران در سال ۱۳۹۷ در پژوهشی با عنوان پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی موجود در واحدهای کارستی و سازند سخت کوه مورو–صوفیان با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره AHP، SAW و F-AHP به این

نتیجه رسیدند که با روش میانگین‌گیری وزنی درجه‌ای و با استفاده از تابع حسابگر (Raster Calculator) نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در پنج گروه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی کردند و با موقعیت چشمه‌ها و قنات‌ها اعتبارسنجی کردند. اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی به دست آمده با موقعیت چشمه‌های منطقه نشان داد که مدل F-AHP و SAW نتایج مشابهی را ارائه می‌دهد. نتیجه این پژوهش نشان دادبخش مرکزی تاقدیس مورو پتانسیل بالایی از آب زیرزمینی را به‌ویژه در یال شمالی دارد. تراکم شکستگی و نوع لیتولوژی منطقه بیشترین تأثیر را بر تشکیل منابع آب زیرزمینی منطقه داشته است.

مکرم و نگهبان در سال ۱۳۹۸ در مقاله‌ای با عنوان بررسی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن با استفاده از روش فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی در بخش‌هایی از غرب استان فارس به این نتیجه رسیدند که در شمال غربی و قسمتی از جنوب شرق استان فارس احتمال کارست با توجه به نقشه‌ها صد درصد است؛ در حالی که مناطق مرکزی کارست کمتری دارند و قسمت‌هایی از حاشیه منطقه در شرق و غرب بدون کارست هستند. به‌منظور بررسی و تعیین صحت مدل از بعضی نقاط نمونه استفاده و با توجه به نقاط نمونه مشخص شد مدل دقت زیادی برای تعیین مناطق کارستی دارد. بنابراین از روش فازی می‌توان به‌مثابه روشی دقیق برای بررسی پتانسیل کارستی مناطق مختلف استفاده کرد.

رضایی عارفی و همکاران در سال ۱۳۹۹ در پژوهشی با عنوان پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی مطالعه موردی حوضه کوهستانی کلات در خراسان رضوی به این نتیجه رسیدند که از کل مساحت حوضه کلات، ۱۹/۰۴ درصد در طبقه کمتر توسعه‌یافته، ۲۴/۵۷ درصد در طبقه توسعه‌نیافته، ۴۲/۰۱درصد در طبقه متوسط و ۱۴/۳۸ درصد در طبقه توسعه‌یافته قرار گرفته است. از این‌رو، عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰/۵۳ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده پتانسیل توسعه کارست در منطقه مورد مطالعه بوده است و عامل کاربری اراضی با ارزش ۰/۰۱ 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، ارتفاع، توپوگرافی و فاصله از آبراهه مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی کارست در این منطقه داشته‌اند.

پور اکبری و همکاران در سال ۱۳۹۹ در مقاله‌ای با عنوان پتانسیل‌یابی منابع آب کارستی با استفاده از RS، GIS و AHP (مطالعه موردی: تاقدیس–های لیلی و کی‌نو در شمال شرق خوزستان) به این نتیجه رسیدند که بخش مرکزی تاقدیس از بیشترین پتانسیل برخوردار است. از طرف دیگر دماغه شمال غربی (سازند گرو) دارای کمترین پتانسیل است. چشمه‌ها و دولین‌های موجود، در محدوده با پتانسیل بالا قرار گرفته‌اند.

نخعی و همکاران در سال ۱۴۰۲ در مقاله‌ای با عنوان پهنه‌بندی توسعه کارست در حوضه آبریز بقمچ کشف رود با مدل منطق فازی ANP به این نتیجه رسیدند که ۱۶,۳ درصد از مساحت منطقه در پهنه با پتانسیل توسعه بسیار زیاد، ۳۳,۷ درصد با توسعه زیاد، ۶,۶ درصد با توسعه متوسط ، ۳,۶ درصد با توسعه کم و ۳۹,۸ درصد فاقد کارست است. عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰,۲۳۳ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل کننده پتانسیل توسعه کارست در منطقه مورد مطالعه بوده

است و عامل فاصله از آبراهه و کاربری اراضی کمترین وزن را به خود اختصاص داده و کمترین تأثیر را در کارست زایی کنونی حوضه به خود اختصاص داده است. نتایج نشانگر آن است که به ترتیب عوامل لیتولوژی، بارش، دما و ارتفاع مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی کارست در این منطقه داشته‌اند.

با توجه به اهمیت مناطق کارستی، پژوهش‌های به نسبت جامعی در جهان در رابطه با توسعه کارست صورت گرفته است که در این میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

از کلیک[۷] و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی با عنوان ارزیابی جایگزین‌های تأمین آب پایدار در توده‌های سنگی کارستی شده با استفاده از روش GIS و AHP برای منطقه شهری آنتالیا (ترکیه) به این نتیجه دست یافتند که انتظار می‌رود در آینده نزدیک تقاضا برای آب با افزایش جمعیت و عملیات کشاورزی در منطقه شهری آنتالیا به میزان قابل‌توجهی افزایش یابد. به همین دلیل، منابع آب جایگزین برای آینده آنتالیا مهم هستند. این مطالعه یک روش مفید برای یافتن جایگزین‌های تأمین آب برای مناطق شهری مانند آنتالیا ارائه می‌کند. در این مطالعه، توده‌های سنگ کارستی شده برای هیدرو سیستم‌های کارستی و منبع آب منافذ سنگ با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، این مطالعه ارزش عملی تأمین آب از منافذ سنگ و همچنین امکان کاربرد و انتخاب مناطق بالقوه را مورد بحث قرار می‌دهد.

همدانی و بعالی[۸] در سال ۲۰۲۰ در مقاله خود با عنوان شناسایی مناطق بالقوه آب زیرزمینی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک‌های ژئوماتیک یکپارچه در مرکز اطلس میانه (مراکش) به این نتیجه رسیدند که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ابزاری ارزشمند است که توسط متخصصان مختلف برای ارتقای ظرفیت مدیریتی خود به کار گرفته شده است. در این پژوهش، یک رویکرد سازگار برای شناسایی مناطق بالقوه آب زیرزمینی (GWP) از طریق استفاده از تکنیک‌های AHP، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و (RS) در مراکش استفاده شد. نتایج نشان داد که تنها ۳٫۸۸ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل آب زیرزمینی بسیار خوب و ۱۷٫۲۲ درصد دارای پتانسیل خوب، علاوه بر ۲۰٫۲۰ درصد با پتانسیل متوسط است، در حالی که در بیشتر مناطق منطقه، ۲۹٫۸۹ درصد دارای پتانسیل آب زیرزمینی ضعیف است و ۱۸٫۶۰ درصد در پتانسیل آب زیرزمینی بسیار ضعیف و ۱۰٫۴۹ درصد با پتانسیل کارستی ندارند.

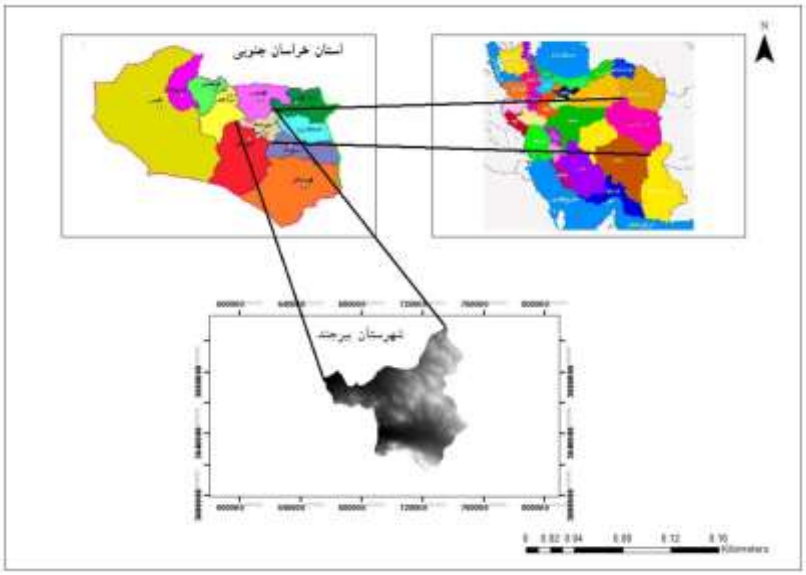
عبدالکریم و عبدا... در سال ۲۰۲۲ در مقاله با عنوان آشکارسازی مناطق بالقوه منابع آب با استفاده از داده‌های سنجش از دور یکپارچه و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مبتنی بر GIS به این نتیجه رسیدند که بخشی از وادی الصحبا عربستان سعودی برای آشکارسازی و مدل‌سازی مساحت بالقوه آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های یکپارچه سنجش از دور، زمین‌شناسی و هیدرولوژی از طریق روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مبتنی بر GIS آزمایش می‌شود. نقشه اکتشاف خروجی نشان داد که پنج منطقه پیش‌بینی آب زیرزمینی (GPZs) بسیار کم (۱۱٫۵۵٪)، کم (۲۸٫۱۸٪)، متوسط (۲۹٫۱۴٪)،

7- Ozcelik
8- Hamdani and Baali

زیاد (۲۲,۴۱٪) و بسیار زیاد (۸,۷۳٪) هستند. بیشترین مناطق پیش بینی شده بخش وسیعی از الخرج و پایین‌دست وادی الصهبه را پوشش می‌دهند. از آنجایی که منطقه تحت مطالعه در نزدیکی شهر بیرجند قرار دارد، لذا بهره‌برداری از آب مناطق کارستی می‌تواند در تأمین آب شرب شهرستان بیرجند اهمیت زیادی داشته باشد. بنابراین هدف از پژوهش حاضر پتانسیل‌یابی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی با استفاده از مدل AHP است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی است. شهرستان بیرجند از نظر موقع ریاضی 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 باغران، حداقل ارتفاع آن ۱۳۶۰ متر در غرب شهرستان و میانگین ارتفاع ۱۸۸۴ متر است. متوسط دمای سالیانه در ارتفاعات ۱۱,۴ درجه و در دشت ۱۳,۸ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارندگی سالانه ۱۶۷ میلی‌متر است که بیشترین میزان آن مربوط به فصول زمستان و بهار است . بیرجند از شمال به شهرستان قاین، از جنوب به شهرستان نهبندان و کرمان، از شرق به افغانستان و از غرب به شهرستان‌های فردوس و طبس محدود می‌شود. شهرستان بیرجند دارای ۴ شهر، ۴ بخش و ۱۹ دهستان است. شهرستان بیرجند، از قسمت‌های مختلف، شامل جلگه، دشت، و ارتفاعات تشکیل‌شده است. بیرجند با توجه به وضعیت پستی و بلندی‌ها دارای: ۱- اقلیم خشک و گرم شامل مناطق دشت و حاشیه شهرستان ۲- اقلیم خشک ملایم که در بخش‌های مرتفع شمالی و مرکزی شهرستان یعنی نقاط مرتفع کوه‌های »باغران« و »مؤمن آباد« مشاهده می‌شود. لذا 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 با توجه به 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. فصل گرم بیرجند معمولاً طولانی است و ماه‌های خرداد و تیر و مرداد را در بر می‌گیرد و ایام سرد سال شامل ماه‌های آذر و دی و بهمن است. بیرجند، به‌طور میانگین در ۷۲ روز از سال دارای دمای زیر صفر درجه و در ۱۴۲ روز از سال دارای دمای بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد است.



شکل ۱: نقشه موقعیت شهرستان بیرجند

داده‌ها و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از روش‌های میدانی، کتابخانه‌ای و اسنادی صورت گرفته است. در ابتدا با استفاده از Dem ۳۰ متر، محدوده مورد مطالعه تعیین گردید. با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ بیرجند و زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند جهت استفاده در شناسایی لند فرم‌ها و سازندهای کربناته استفاده گردید. در این پژوهش با توجه به منابع موجود(فایل رقومی ارتفاع) و تهیه نقشه‌های مربوطه و بر اساس درجه اهمیت پارامترهای تأثیرگذار در توسعه منابع آب کارست در شهرستان بیرجند فاکتورهای مهم انتخاب شدند. با توجه به نقش عوامل متعدد و توسعه کارستیفیکاسیون درگذشته منطقه و نقش عوامل مختلف در توسعه کارست، نه لایه اطلاعاتی انتخاب شدند. با استناد به مطالعات میدانی و نظر کارشناسان و مشاوران ، عامل لیتولوژی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در توسعه منابع آب کارست شهرستان بیرجند انتخاب شد و بعد از آن فاصله از گسل با توجه به نقش مهم آن در توسعه درز و شکاف انتخاب گردید. بعد از آن لایه فاصله از آبراهه انتخاب شدند. کمترین اهمیت به لایه کاربری اراضی داده شد. بر اساس منابع مطالعاتی موجود از بین عوامل دخیل در تحول کارست، در این پژوهش لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، فاصله از گسل، اقلیم (بارش و دما)، ارتفاع، شیب، فاصله از آبراهه، جهت شیب و کاربری اراضی به‌عنوان نقشه‌های عامل در نظر گرفته شدند و به‌منظور استخراج پتانسیل‌یابی منابع آب کارست، لایه‌های فوق در محیط GIS فراخوانی شد. لایه‌های اطلاعاتی مختلف با اعمال نظرات کارشناسی و اختصاص وزن به هر لایه و بازدیدهای میدانی به‌صورت نقشه‌های معیار طبقه‌بندی شدند و با توجه به وزن به دست آمده، نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب کارست منطقه مورد مطالعه به دست آمد. برای تهیه مدل پتانسیل سنجی منابع آب کارست، لایه‌های اطلاعاتی فوق به نرم‌افزار Arc GIS 10.3 معرفی شدند. لایه‌های اطلاعاتی فوق به‌صورت نقشه‌های معیار طبقه‌بندی

شده‌اند و با توجه به درجه اهمیت هرکدام از پارامترها، رتبه‌ای از ۱ تا ۹ بر اساس روش توماس آل ساعتی[9] (ساعتی، ۱۹۸۰:۱) به آن‌ها داده شد. انتخاب این ارزش‌ها بر اساس اعمال نظر کارشناسی و شناخت منطقه بوده است. پس از ارزش دهی به هر یک از لایه‌ها بر اساس روش کارشناسی و روش AHP وزن مناسبی که مشخص کننده تأثیر هر عامل در درجه توسعه منابع آب کارست است، به آن‌ها داده شد. لازم به ذکر است که جمع وزن‌ها عدد ۱ در نظر گرفته شد. سپس از نرم‌افزار **EXPERT choice** که بر اســاس روش تحلیل سلسله مراتبی طراحی شده است، جهت وزن دهی پارامترها استفاده شد. بعد از آن نقشه رستری نه پارامتر مذکور در محیط GIS تهیه و هر یک از این نقشه‌های رستری طبقه‌بندی شدند.

مدل تحلیل سلسله مراتبی (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 سلسله مراتبی چند سطحی 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 چند معیاره 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 به‌طور 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).

تحلیل سلسله مراتبی 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 نمودن 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 با توجه به 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

9- saaty

مقایسات محاسبه گردید. نتیجه محاسبه نرخ سازگاری نشان‌دهنده عدد کمتر از ۰/۱ بود که نشان از صحت مقایسات بود(جدول۱).

جدول ۱: مقایسات زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی 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[۱۰] و همکاران، ۲۰۱۵). برای بررسی نرخ سازگاری از رابطه زیر استفاده گردید.

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

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.

یافته‌های پژوهش

نتایج مدل AHP

در ابتدا پرسشنامه مقایسه زوجی پارامترهای مؤثر بر پتانسیل‌یابی منابع آب شهرستان بیرجند در اختیار متخصصان کارست قرار گرفت. بعد از انجام مرحله مقایسه زوجی و مقایسه دو به دوی معیارها با یکدیگر ، وزن‌های مربوطه وارد نرم‌افزار اکسپرت چویس (Expert Choice) شد و وزن هر یک از معیارها مشخص گردید (جدول ۲)(جدول۳). نمودار ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست طبق فرایند تحلیل سلسله مراتبی در

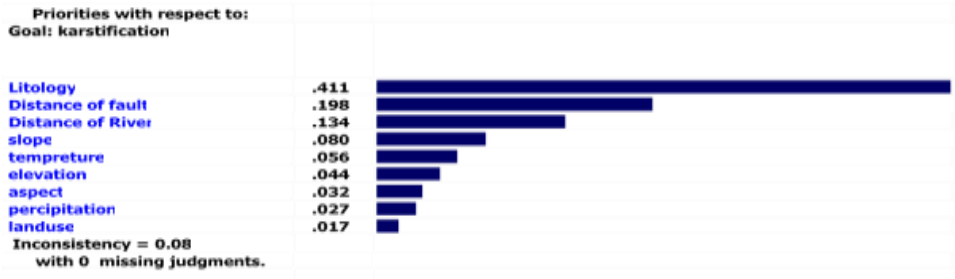
نرم‌افزار اکسپرت چویس با مقدار شاخص ناسازگاری ۰/۰۸محاسبه گردید(شکل۲). بعد از تعیین وزن هر معیار با استفاده از نرم‌افزار ArcGis10.3 وزن هر معیار در لایه مربوطه ضرب گردید و لایه‌های مربوط به هر معیار با یکدیگر ادغام شده و نقشه پتانسیل توسعه منابع آب کارست بر اساس مدل AHP تهیه گردید.

جدول۲: وزن دهی عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی 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

جدول۳: وزن لایه‌های اطلاعاتی به روش AHP و اعمال نظر کارشناسی در منطقه مورد مطالعه

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



شکل۲: نمودار ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست طبق فرایند تحلیل سلسله مراتبی

پارامترهای مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست

عامل لیتولوژی

به علت تأثیرگذاری شدید نوع سازند بر نفوذ آب و قابلیت متفاوت حفظ آب در سازندهای مختلف این نمایه مد نظر قرار گرفته است(پور اکبری و همکاران، ۱۳۹۹). خصوصیات مختلفی از قبیل میزان رخنمون، ضخامت و خصوصیات لیتولوژیکی سنگ‌های کارستی و ارتباط با لیتولوژی های دیگر در مقیاس ناحیه‌ای، کنترل کننده‌های زمین‌شناسی توسعهٔ کارست را تشکیل می‌دهند (رضایی و همکاران،۱۳۹۹). منطقه مورد مطالعه در بخشی از فلات ایران که از نقطه نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در محدوده زیر ناحیه نهبندان–خاش یا فلیش قرار دارد. به‌طور کلی در نتیجه تحولات زمین‌ساختی در این منطقه، انواع رخساره‌های آذرین رسوبی و دگرگونی دوران دوم و سوم زمین‌شناسی گسترش یافته است. در دوران کواترنری نیز نهشته‌های آبرفتی ناشی از فرایندهای مورفوکلیما، مورفوژنز و مورفوتکتونیک منطقه در قسمت‌های مختلف به‌ویژه در پهنه‌های مشرف به ارتفاعات گسترش دارد. به‌طور عمده سازندهای متعلق با دوران کربونیفر تا ترشیاری در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. مجموعه سنگ‌های کوهستان باقران در جنوب شهر بیرجند به‌عنوان یک مجموعه آمیزه رنگین معرفی شده است(اشتوکلین، ۱۳۶۸). قدیمی‌ترین رخنمون‌های این واحدها به دوره پرمین مربوط به سنگ‌های پریدوتیت است و وسیع‌ترین گسترش رخنمون‌ها متعلق به رسوبات سطح پایین مخروطه افکنه و رسوبات تراس‌های دره با ۵۷۴٫۸ کیلومتر مربع و توف آندزیتی داسیتی با ۵۲۲٫۶ کیلومتر مربع است. سازندهای آهکی عمده منطقه مورد مطالعه، آهک نومولیتی، سنگ‌آهک، آهک پلاژیک و رسوبات فلیش از نوع آهک می‌باشد که در شمال غربی و جنوب منطقه مورد مطالعه گسترش دارد. در منطقه مورد مطالعه در مجموع ۳۶ واحد سنگی وجود دارد که بر روی نقشه زمین‌شناسی(شکل۳) مشخص شده است. مطالعات زمین‌شناسی در مناطق کارستی، با توجه به اهمیت خیلی زیاد نوع لیتولوژی در توسعه منابع آب کارست و کارست زایی اهمیت زیادی دارد. وجود سنگ‌های انحلال پذیر یکی شرایط اصلی در توسعه پهنه‌های کارستی می‌باشد. طبق طبقه‌بندی، آهک نومولیتی، سنگ‌آهک و گل سنگ‌آهکی برای پتانسیل کارست زایی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. در جدول ۴، توزیع مشخصات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه همراه با سن، مساحت به درصد و مساحت به کیلومتر مربع آورده شده است.

جدول ٤: مشخصات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

ردیف	واحد سنگی	مشخصه به زبان انگلیسی	مشخصه به فارسی	سن	مساحت به درصد	مساحت به کیلومتر مربع
۱	E1L	nummolitic Limestone	آهک نومولیتی	ائوسن	۱٫۹۱	۷۵٫۵
۲	E1m	Marl, gypsiferous marl and limestone	مارن، مارن گچی و سنگ‌آهک	اوایل ائوسن	۰/۲۷	۱۰٫۷
۳	E2c	Conglomerate and sandstone	کنگلومرا و ماسه‌سنگ	اواسط ائوسن	۰/۳۲	۱۲٫۷
٤	E2s	Sandstone, marl and limestone	ماسه‌سنگ، مارن، و سنگ‌آهک	ائوسن	۴٫۳۹	۱۷۲٫۸

۵	E2sht	Tuffaceous shale and tuff	شیل و توف	ائوسن	۰	۰,۱۰۱۰۹۱
٦	Eavt	Andesitic volcanic tuff	توف آتشفشانی آندزیتی	ائوسن	۳,۳۶	۱۳۲,۳
۷	Ed.avs	Dacitic to Andesitic volcanosediment	رسوبات آتشفشان داسیتی تا آندزیتی	ائوسن	۱,۷۴	۶۸,۷
۸	Ktzl	Thick bedded to massive, white to pinkish orbitolina bearing limestone ((TIZKUH FM	سنگ‌آهک دارای بستر ضخیم تا حجیم، سفید تا صورتی مایل به اربیتولین	اوایل کرتاسه	۰/۰۷	۶,۶
۹	Kuf	Flysch type sediments including shale, sandstone, limestone and conglomerate	رسوبات نوع فلیش شامل شیل، ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک و کنگلومرا	اواخر کرتاسه	۶,۱	۲۴۲,۳
۱۰	Kus	Flysch turbidite sandsone with interbedd calcareous mudstone and shale	ماسه‌سنگ توربیدیت فلیش با گل سنگ‌آهکی و شیل بین لایه‌ای	اواخر کرتاسه	۱,۸۸	۷۶,۴
۱۱	L.E.Oa.bv	Andesitic to basaltic volcanic	آتشفشانی آندزیتی تا بازالتی	کرتاسه– پالئوسن	۰/۷	۳۱,۴
۱۲	L.E.O.av	Andesitic volcanic	آتشفشان آندزیتی	اواخر ائوسن– الیگوسن	۱,۵۵	۶۱,۳
۱۳	L.E.Od.avb	Dacitic to andesitic volcanobreccia	برش آتشفشانی داسیتی تا آندزیتی	ائوسن– الیگوسن	۰/۰۷	۶,۷
۱٤	Murm	Ligth - red to brown marl and gypsiferous marl with sandstone intercalations	مارن روشن – قرمز تا قهوه‌ای و مارن گچی با ماسه‌سنگ‌های درون‌آمیزی	میوسن	۰,۰۹	۳,۶
۱۵	OMa.bv	Andesite and andesitic lava flow	جریان گدازه آندزیتی و آندزیتی	الیگوسن– میوسن	۵,۳۸	۲۱۱,۹
۱٦	OMat	Andesitic tuff	توف آندزیتی	الیگوسن	۲,۳۱	۹۱,۳
۱۷	OMd.at	Dacitic Andesitic tuff	توف آندزیتی داسیتی	الیگوسن– میوسن	۵,۶	۵۲۲,۶
۱۸	OMd.av	Dacitic Andesitic volcanic	داسیتی آندزیتی آتشفشانی	الیگوسن– میوسن	۹,۱	۳۶۰,۹
۱۹	OMgr-di	Granite to diorite	گرانیت به دیوریت	الیگوسن– میوسن	۰,۳۴	۱۳,۶
۲۰	Oav	Oligocene andesitic lava flows	جریان گدازه الیگوسن آندزیتی	الیگوسن	۱,۰۳	۴۰,۹
۲۱	Od.av	Dacitic to andesitic volcanic	آتشفشانی داسیتی تا آندزیتی	الیگوسن	۰,۳۲	۱۲,۸
۲۲	Pd	Peridotite including harzburgite, dunite, lerzolite and websterite	پریدوتیت شامل هارزبورگیت، دونیت، لرزولیت و وبستریت	ترشیاری– کرتاسه	۱,۲۸	۵۰,۷

۲۳	PeEf	Flysch turbidite, sandstone and calcareous mudstone	فلیش توربیدیت، ماسه‌سنگ و گل سنگ‌آهکی	پالئوسن– ائوسن	۱۷,۹	۷۰۴,۹
۲٤	PeEm	Marl and gypsiferous marl locally gypsiferous mudstone	مارن و مارن گچی گلسنگ محلی گچی	پالئوسن– ائوسن	۰,۴۰	۱۵,۹
۲۵	PeEph	Phyllite	فیلیت	پالئوسن– ائوسن	۰,۹۱	۳۵,۸۸
۲٦	PlQbv	Basaltic volcanics	آتشفشان های بازالتی	پالئوسن– کواترنری	۰/۸۶	۳۳,۹۸
۲۷	Plc	Polymictic conglomerate and sandstone	کنگلومرا پلیمیکتیک و ماسه‌سنگ	پلیوسن	۸,۱	۳۱۹,۵
۲۸	Pld.asv	Dacitic to andesitic subvolcanic rocks	سنگ‌های ساب آتشفشانی داسیتی تا آندزیتی	پلیوسن	۰/۴۴	۱۷,۶
۲۹	Qbv	Olivine basalt and basalt related to Bazman Volcanism and partly related to Taftan Volcanism	بازالت الیوین و بازالت مربوط به آتشفشان بزمان و تا حدودی مربوط به آتشفشان تفتان	کواترنری	۰/۲	۸,۲
۳۰	Qcf	Clay flat	رس	کواترنری	۱,۶۸	۶۶,۲
۳۱	Qft1	High level piedmont fan and vally terrace deposits	مخروطه افکنه و تراس‌های آبرفتی	کواترنری	۴,۱	۱۶۴,۴
۳۲	Qft2	Low level piedment fan and vally terrace deposits	رسوبات سطح پایین مخروطه افکنه و رسوبات تراس‌های دره	کواترنری	۱۴,۶	۵۷۴,۸
۳۳	db	Diabase	دیاباز	کرتاسه پایانی	۰,۰۲	۱,۱
۳٤	om1	Tectonized association of peridotites, gabbro, diorite, trondhjemite, diabase and basic volcanics (Ophiolite (Melange	ارتباط تکتونیزه پریدوتیت ها، گابرو، دیوریت، ترونجمیت، دیاباز و آتشفشان های پایه (افیولیت ملانژ)	ترشیاری– کرتاسه	۰/۸۵	۳۳,۶
۳۵	Sp	Spilitic rocks locally with pillow structure	سنگ‌های اسپیلیتی به‌صورت محلی با ساختار بالشی	کرتاسه	۱,۴۴	۵۷
۳٦	tm	Tectonic melange - association of ophiolitic components, pelagic limestone, radiolarian chert and shale with or without Eocene sedimentary rocks (Coloured Melange (complex	ملانژ تکتونیکی – ترکیب اجزای افیولیتی، سنگ‌آهک پلاژیک، چرت رادیولاری و شیل با یا بدون سنگ‌های رسوبی ائوسن (مجموعه ملانژ رنگی)	تریاس– پالئوسن	۱,۵	۵۹

عامل فاصله از گسل

براثر عملکرد فرآیندهای تکتونیکی، درز و شکاف‌ها در جهت‌های عمودی، افقی و مایل در توده‌های سنگی ایجاد و گسترش می‌یابند. درزه و شکاف‌هایی که به‌صورت یک شبکه گسترش می‌یابند در شکل‌گیری و تشکیل اشکال زیرزمینی مانند مجاری به هم‌پیوسته و تشکیل آبخوان‌های کارستی نقش بسیارمهمی بازی می‌کنند. پارامتر فاصله از گسل رابطه معکوس با توسعه کارست دارد. زیرا در مناطق نزدیک گسل به علت تکتونیزه بودن و وجود درزه و شکاف، میزان نفوذپذیری سنگ‌ها بیشتر بوده و در نتیجه میزان کارست زایی افزایش می‌یابد(صفاری و همکاران، ۱۳۹۸). علت اصلی نفوذپذیری سنگ‌های کربناته، وجود درزه‌ها است که امکان ورود آب و جریان یافتن آن را به داخل توده سنگ فراهم می‌کند. (قبادی، ۱۳۸۸). شکستگی‌ها و ساختارهای تکتونیکی که اصطلاحاً خطواره نیز نامیده می‌شوند، به دلیل ایجاد فضاهایی در سازندها و واحدهای زمین‌شناسی جهت عبور آب و حرکت آن به نقاط پایین‌تر درون زمین نقاط ضـــعیفی تلقی می‌شوند که اهمیت آن‌ها در سازندهای سخت و آهکی بیشتر است(محمودی، ۱۳۸۵). بنابراین عامل حریم گسل به‌عنوان پارامتر مثبتی جهت پتانسیل‌یابی توسعه منابع آب کارست مد نظر قرار می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه در یکی از نواحی نسبتاً فعال تکتونیکی شرق کشور قرار گرفته که به‌تبع آن گسل‌هایی با امتداد تقریبی شمال غربی- جنوب شرقی به وجود آمده‌اند. در وزن دهی به لایه گسل، فرض اصلی بر این است که میزان توسعه‌یافتگی کارست در مناطق نزدیک به گسل بیشتر است و وزن بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد و مناطق دور از خطوط گسل وزن کمتری را به خود اختصاص داده است. فاصله از گسل در پنج طبقه برای محدوده مورد مطالعه تهیه گردید (شکل۴) که تا حریم ۵۰۰ متری بیشترین وزن را به خود اختصاص داد یعنی بیشتر مستعد توسعه منابع آب کارست است و حریم بیشتر از ۲۰۰۰۰۰ متر کمترین وزن را به خود اختصاص داد، یعنی کمترین پتانسیل را در منطقه برای توسعه منابع آب کارست دارا می‌باشد.

عامل بارش

وجود آب، فاکتور اصلی اقلیمی در توسعهٔ کارست است، این عامل اصلی‌ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش بوده که به‌صورت طبیعی، کارست در مناطقی پیشرفت می‌کند که میزان بارندگی بالاتر باشد و مناطق خشک یا بسیار سرد مانع از توسعه کارست می‌گردند(صفاری و همکاران،۱۳۹۷). یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در توسعه کارستیفیکاسیون، اقلیم و در رأس آن بارش است. بارندگی با ایجاد آب زیرزمینـی به‌وسیله عواملی مانند توپوگرافی، پوشش گیاهی و لیتولوژی کنترل می‌شود، این فاکتورها بر مقدار آبی که به درون زمین نفوذ می‌کند، مؤثر می‌باشند. با توجه به اینکه حجم بارش در توسعه کارست و پتانسیل آب‌های کارستی نقش مهمی ایفا می‌کند، اقدام به تهیه لایه اطلاعاتی بارش گردید. طبق مبانی نظری هرچه بارندگی بیشتر باشد شرایط برای توسعه کارست مستعدتر است. به عبارتی بارندگی بالای ۳۰۰ میلی‌متر شرایط مساعدی را برای توسعه کارست در یک منطقه فراهم می‌کند. در منطقه مورد مطالعه لایه بارندگی به چهار طبقه کاملاً مناسب با بارش ۳۰۰-۲۵۰ میلی‌متر، مناسب با بارش ۲۵۰-۲۰۰ میلی‌متر، نسبتاً مناسب با بارندگی ۲۰۰-۱۵۰ میلی‌متر و

نامناسب با بارندگی ۱۵۰–۱۰۰ میلی‌متر تقسیم شده است. 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 ۵).

عامل دما

یکی دیگر از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست، عامل دما یا درجه حرارت است. طبق مبانی نظری هر چه دما پایین‌تر باشد امتیاز بالاتری را در توسعه منابع آب کارست می‌گیرد. لایه دما در محدوده مورد مطالعه به پنج طبقه تقسیم‌شده است که بر اساس محاسبه میانگین دمای ایستگاه سینوپتیک شهرستان بیرجند صورت گرفته است. بالاترین امتیاز را دمای بین ۱۳–۱۱ درجه سانتی‌گراد به خود اختصاص داد و کمترین امتیاز را دمای بین ۲۳–۱۹ درجه سانتی‌گراد به خود اختصاص داد. (شکل ۶).

عامل ارتفاع

در مناطق مرتفع‌تر، آب و هوا سردتر است و در نتیجه هوازدگی فیزیکی مؤثرتر می‌باشد. همچنین آب دریافتی از طریق بارش‌ها نیز بیشتر است(صفاری و همکاران،۱۳۹۷). یکی از عوامل فیزیکی که نقش مهمی در میزان بارش، تبخیر و تعرق، درجه حرارت و پوشش گیاهی دارد، ارتفاع می‌باشد. به‌طورکلی عامل ارتفاع یا پستی و بلندی اهمیت زیادی در تغذیه و تخلیه و برون‌زد چشمه‌های کارستی در یک منطقه را دارا است. با افزایش ارتفاع در یک منطقه پتانسیل توسعه منابع آب کارست افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش ارتفاع، میزان درجه حرارت کاهش و میزان بارندگی افزایش پیدا می‌کند(زروش و همکاران، ۱۴۹:۱۳۹۳). نقشه رستری طبقات ارتفاعی حوضه مورد مطالعه با استفاده از دستور Reclassify در ArcGIS 10.3.1 در۸ طبقه به دست آمد (شکل ۷). حد ارتفاعی که دارای بیشترین مساحت است در ترازهای ارتفاعی ۱۷۰۰–۱۵۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. کمترین مساحت نیز مربوط به ترازهای ارتفاعی کمتر از ۱۳۵۲ متر است. در وزن دهی به عامل ارتفاع، بیشترین امتیاز در طبقه ارتفاعی ۲۶۹۵–۲۵۰۰ متر و کمترین امتیاز در طبقه ارتفاعی کمتر از ۱۳۵۲ متر را به خود اختصاص داد.

عامل شیب

شیب نقش مهمی در سرعت جریان آب ایفا می‌کند. این عامل نفوذ آب به درون زمین را کنترل می‌کند. در مناطقی که شیب ملایم است، رواناب سطحی فرصت بیشتری جهت تماس با محیط و نفوذ را دارد، در حالی که در مناطق با شیب زیاد جریان رواناب راحت‌تر صورت می‌گیرد و این امر باعث کاهش نفوذ آب باران می‌شود (پور اکبری و همکاران،۱۳۹۹). از فاکتورهای توپوگرافی مؤثر که گرادیان هیدرولیکی و جهت حرکت آب زیرزمینی را تعیین می‌کند، شیب توپوگرافی است. میزان شیب هم در میزان رواناب حاصل از بارش و هم در میزان نفوذ آب به داخل زمین و فرایند انحلال توسط بارندگی

نقش مؤثری ایفا می‌کند(زروش و همکاران، ۱۳۹۳ :۱۵۰). نقشه نهایی شیب منطقه مورد مطالعه در ۸ طبقه از کلاس ۳-۰ درصد تا بیشتر از ۳۴ درصد به دست آمد (شکل ۸). با توجه به مبانی نظری، شیب‌های کم و مناطق مسطح بیشترین پتانسیل در کارستی شدن را دارا می‌باشند. در حوضه مورد مطالعه شیب ۱۵-۰ درصد در قلمرو شیب کم می‌باشند. گسترش پدیده کارست درشیب‌های کم به دلیل تماس بیشتر آب با آهک بیشتر بوده و پدیده انحلال در این شیب‌ها تشدید می‌شود. در حوضه مورد مطالعه بیشترین امتیاز در وزن دهی را شیب بین ۰-۳ درصد و کمترین امتیاز را شیب‌های بالاتر از ۳۴ درصد به خود اختصاص داد.

عامل فاصله از آبراهه

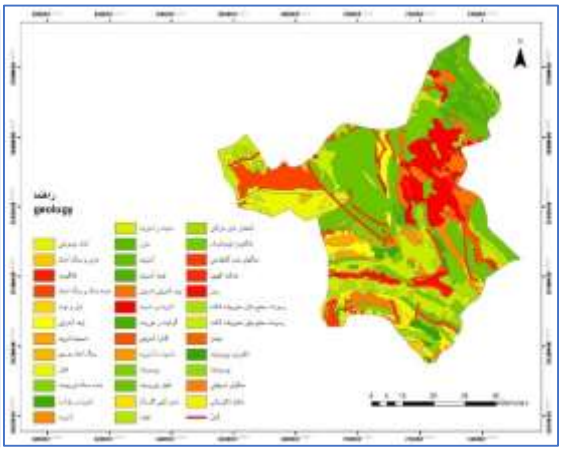
نوع شبکه زهکشی هر منطقه توسط لیتولوژی واحدهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و ساختارهای تکتونیکی و زمین‌شناسی منطقه کنترل می‌شود. از عوامل مهم در پتانسیل کارست زایی، هیدرولوژی، تراکم آبراهه‌ها و فاصله از آن‌هاست که هرچه فاصله از آبراهه کمتر باشد میزان توسعه منابع آب کارست بیشتر خواهد بود(رضایی و همکاران،۱۳۹۹). وزن دهی به این صورت است که در مکان‌هایی که فاصله از آبراهه کم است وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهد چون فرایند کارستی شدن بیشتر خواهد بود و هرقدر فاصله از آبراهه بیشتر شود، میزان توسعه کارست کمتر خواهد بود. شکل ۹ فاصله از آبراهه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. فاصله از آبراهه برای منطقه مورد مطالعه به پنج دسته طبقه‌بندی شده که هرچه فاصله از آبراهه کمتر، وزن بیشتری به خود اختصاص داده است. فاصله از آبراهه تا ۵۰۰ متری بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است یعنی بیشتر مستعد توسعه کارست است زیرا آبراهه‌ها دارای نفوذپذیری خوبی برای تغذیه منابع آب کارست می‌باشند و فاصله بیشتر از ۲۰۰۰۰ متر کمترین وزن را به خود اختصاص داده است یعنی کمترین پتانسیل را در منطقه برای توسعه منابع آب کارست دارد (شکل ۹).

عامل جهت شیب

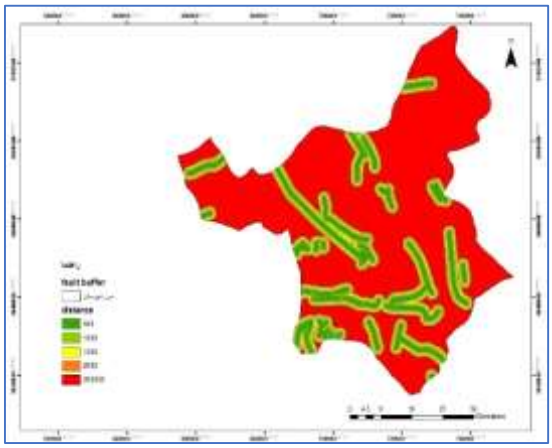
تأثیر جهت شیب بر روی تنوع پوشش گیاهی و بعضی فرآیندهای هیدرولوژیک مانند ذوب برف اهمیت زیادی دارد(علیزاده، ۵۱۳:۱۳۸۹). با توجه به اهمیت کیفیت تابش نور خورشید در تأمین انرژی مورد نیاز مناطق، جهت‌گیری دامنه‌ها نقش مهمی در این ارتباط دارد. به‌طور کلی، مناطق هموار بیشترین اهمیت را در پتانسیل‌یابی منابع آب کارست دارا می‌باشند. 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 توسعه‌یافتگی منابع آب کارست هستند. کمترین امتیاز به جهت‌های جنوبی، جنوب شرقی و جنوب غربی داده شد زیرا در این جهت‌ها، تبخیر بیشتر ، نور آفتاب بیشتر و ماندگاری برف هم کمتر است(شکل۱۰).

عامل کاربری اراضی

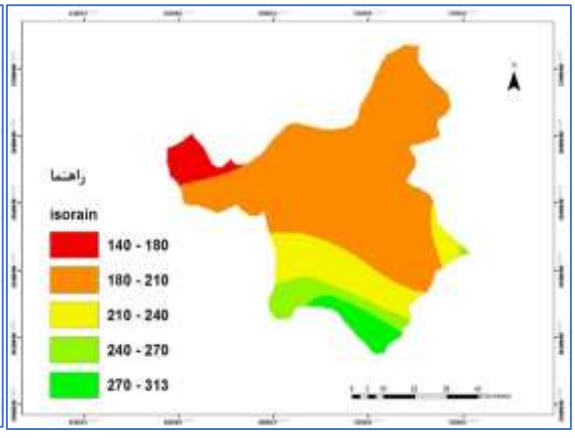
برای بررسی میزان قابلیت پوشش زمین و کاربری اراضی جهت پتانسیل کارست زایی در محدوده موردنظر، از نقشه کاربری اراضی استفاده شده است. بیشترین وزن به جنگل‌ها، درختزارها و بعد از آن به مراتع و کمترین امتیاز به مناطق شهری و بعد از آن به مناطق کشاورزی داده شد. در مناطق جنگلی به علت وجود برگ گیاهان، میزان هوموس خاک افزایش یافته و نفوذپذیری را افزایش می‌دهد. همچنین فشار ریشه گیاهان در این مناطق سبب تخریب و شکستگی سنگ‌ها شده که عامل مؤثری در افزایش میزان نفوذپذیری است. هر چه تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد، از میزان رواناب ناشی از بارندگی‌های شدید جلوگیری شده و زمان لازم جهت نفوذ ریزش‌های جوی فراهم می‌گردد(پور اکبری و همکاران،۱۳۹۹). دلیل اینکه بیشترین وزن به جنگل اختصاص یافته این است که ترشح اسید فولیک از طریق ریشه در جنگل خیلی بیشتر از بقیه پارامترها است (شکل ۱۱).



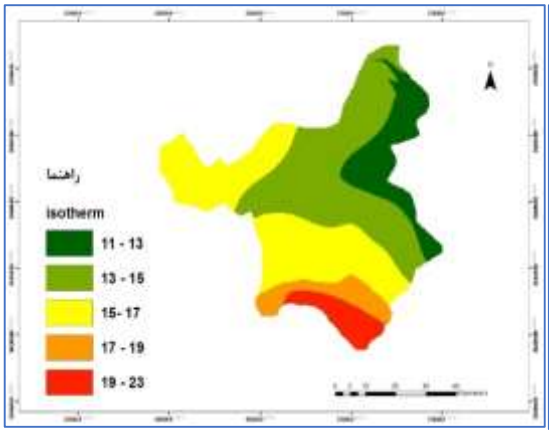
شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی شهرستان بیرجند
(نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند)



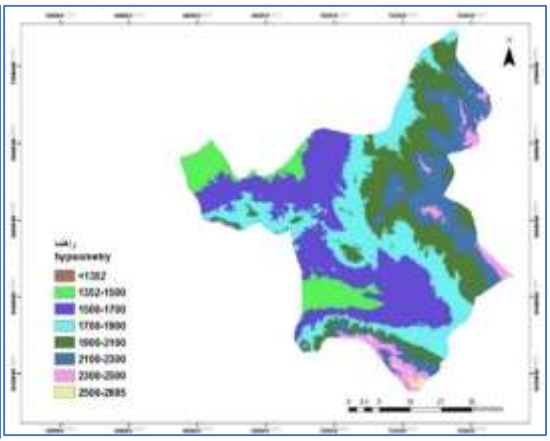
شکل ٤: نقشه فاصله از گسل شهرستان بیرجند



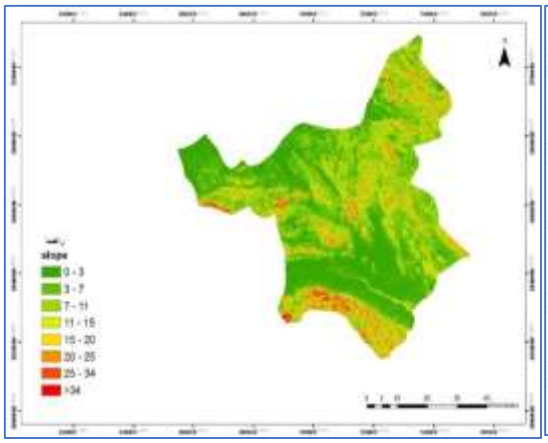
شکل ٥: نقشه هم باران شهرستان بیرجند



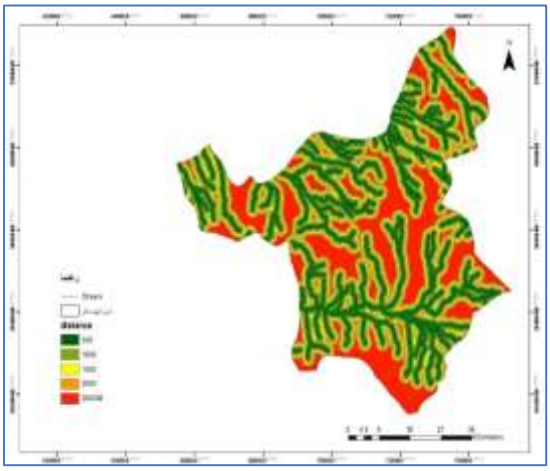
شکل ٦ : نقشه هم‌دمای شهرستان بیرجند



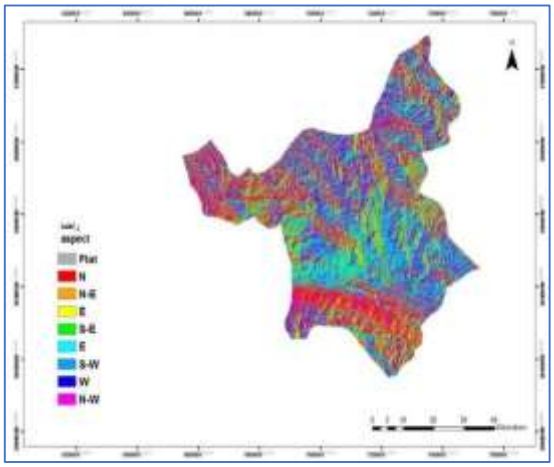
شکل۷ : نقشه طبقات ارتفاعی شهرستان بیرجند



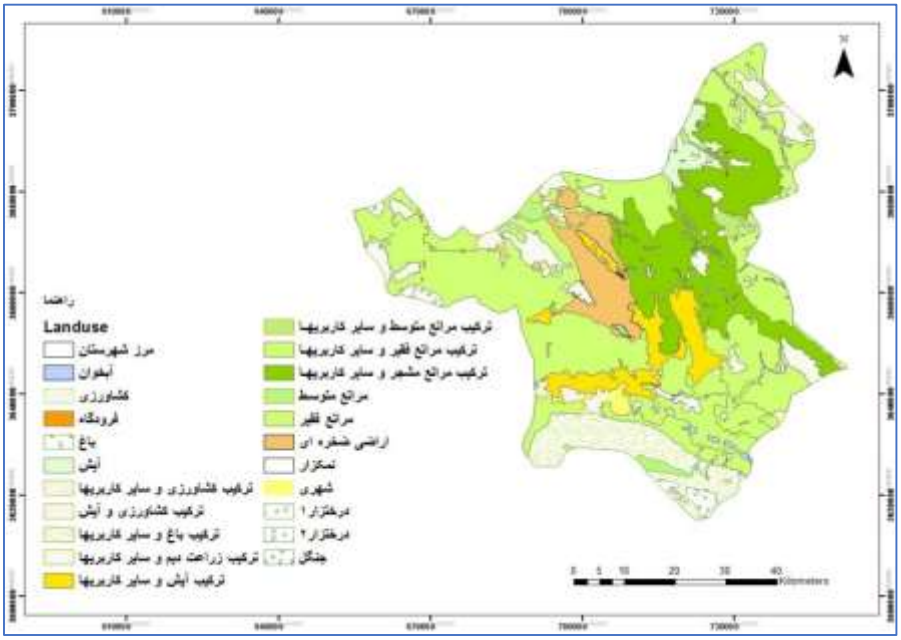
شکل ۸: نقشه شیب شهرستان بیرجند



شکل ۹ : نقشه فاصله از آبراهه شهرستان بیرجند



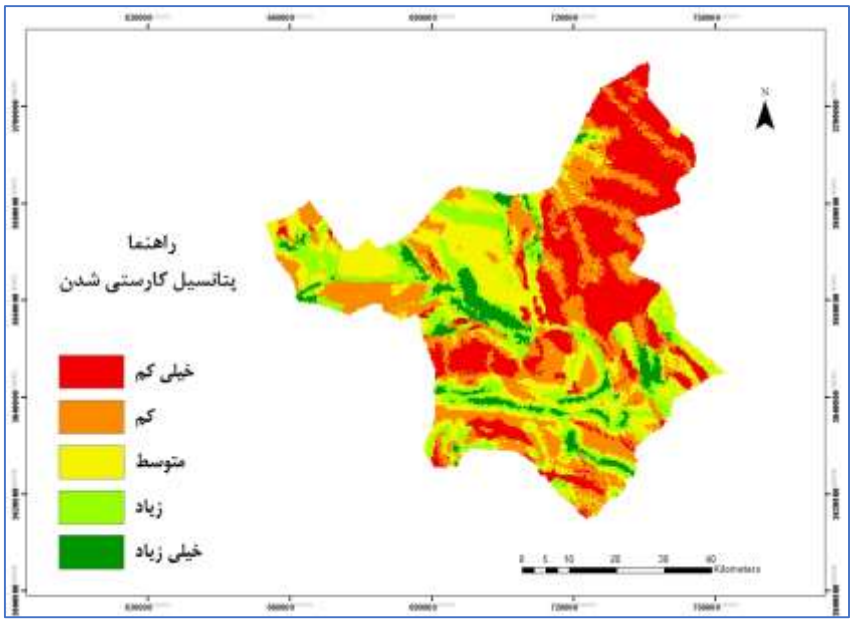
شکل ۱۰ : نقشه جهت شیب شهرستان بیرجند



شکل ۱۱: نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب کارست با مدل تحلیل سلسله مراتبی

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 سلسله مراتبی 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 مورد مطالعه به پنج طبقه: پتانسیل خیلی زیاد، زیاد ، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد. شکل ۱۲ نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب کارست و جدول ۲ مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش تحلیل سلسله مراتبی را نشان می‌دهد که از کل مساحت شهرستان بیرجند، ۲۶/۴۰ درصد در طبقه خیلی کم توسعه‌یافته، ۲۷/۵۸ درصد در طبقه کم توسعه‌یافته، ۲۳/۸۶ درصد در طبقه متوسط، ۱۵/۷۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۶/۴۰ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است که در مناطق جنوبی و شمال غربی محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین از کل مساحت شهرستان بیرجند ۲۲/۱۵درصد در طبقه زیاد و خیلی زیاد از نظر توسعه کارست را دارا می‌باشند(جدول۵). از این‌رو عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰/۴۱ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل کننده پتانسیل توسعه منابع آب کارست در منطقه مورد مطالعه 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 مورد مطالعه داشته‌اند.



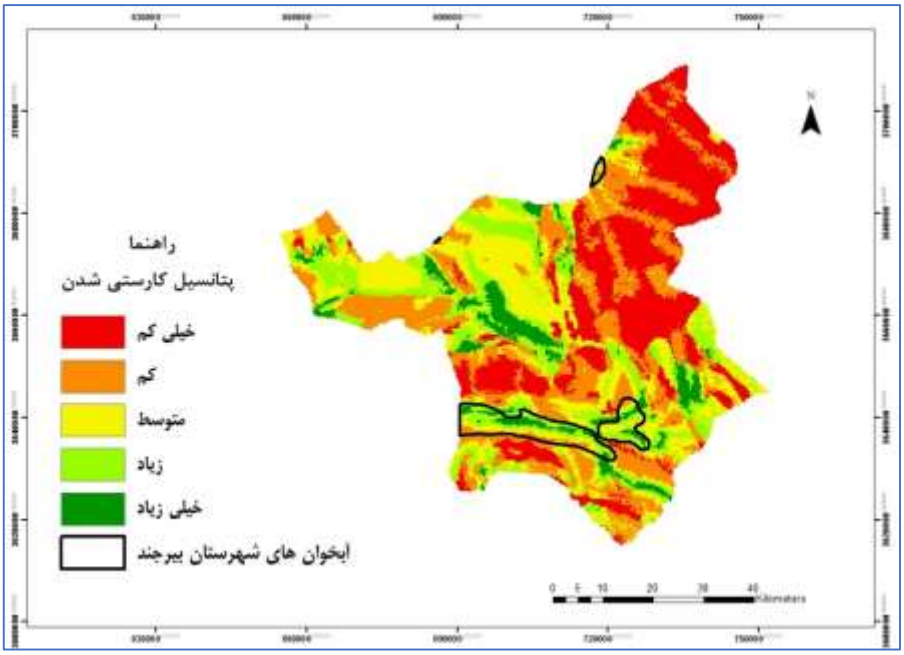
شکل ۱۲ : نقشه پتانسیل منابع آب کارستی در منطقه مورد مطالعه

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
۴	زیاد	۶۲۲	۱۵/۷۵
۵	خیلی زیاد	۲۵۳	۶/۴۰

صحت سنجی و اعتبار سنجی نقشه پتانسیل منابع آب کارست

جهت صحت سنجی نقشه نهایی، لایه آبخوان‌های شهرستان بیرجند بر روی نقشه نهایی فراخوانی گردید و دقیقاً بر روی مناطق توسعه کارست خیلی زیاد و زیاد قرار گرفت. موقعیت آبخوان‌ها در جنوب شهرستان بیرجند قرار گرفته که بر روی نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب کارست کاملاً نمایان است. (شکل۱۳)



شکل۱۳: تلفیق و اعتبار سنجی لایه آبخوان‌های شهرستان بیرجند و لایه پتانسیل کارستی شدن در محدوده مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش پتانسیل سنجی منابع آب کارست در شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی با استفاده از مدل AHP است. بر اساس اصول مبانی کارست و مشاهدات میدانی و یافته‌های دیگر، هشت پارامتر به‌عنوان عوامل مؤثر بر توسعه کارست در منطقه در نظر گرفته شـد. از کل مساحت شهرستان بیرجند، ۲۶/۴۰ درصد در طبقه خیلی کم توسعه‌یافته، ۲۷/۵۸ درصد در طبقه کم توسعه‌یافته، ۲۳/۸۶ درصد در طبقه متوسط، ۱۵/۷۵ درصد در طبقه توسعه زیاد و ۶/۴۰ درصد در طبقه توسعه خیلی زیاد گرفته است که مناطق با توسعه زیاد و زیاد در مناطق جنوبی و شمال غربی محدوده مورد مطالعه

قرار گرفته است. بنابراین از کل مساحت شهرستان بیرجند ۲۲/۱۵درصد در طبقه زیاد و خیلی زیاد از نظر توسعه کارست قرار گرفتند. طبق قضاوت کارشناسان و متخصصان کارست ، عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰/۴۱ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل کننده پتانسیل توسعه منابع آب کارست در منطقه مورد مطالعه 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 لیتولوژی، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی منابع آب کارست در این شهرستان داشته‌اند. جهت صحت سنجی نقشه نهایی، لایه آبخوان‌های شهرستان بیرجند بر روی نقشه نهایی فراخوانی گردید و دقیقاً بر روی مناطق توسعه کارست خیلی زیاد و زیاد قرار گرفت. موقعیت آبخوان‌ها در جنوب شهرستان بیرجند قرار گرفته که بر روی نقشه پتانسیل‌یابی کاملاً نمایان است. با توجه به تهیه نقشه نهایی و اعتبار سنجی نقشه مذکور، می‌بایست مدیران سازمان آب منطقه‌ای خراسان جنوبی اقدام به اکتشاف منابع آب در مناطق مذکور نمایند. با توجه به 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.

منابع

۱- اشتوکلین(۱۳۶۸): زمین‌شناسی و زمین‌ساخت فلات ایران، مترجمان: صادق حداد کاوه و حسن حسنعلی زاده، انتشارات وزارت فرهنگ و آموزش عالی، علمی و فرهنگی، ۱۰۸.

۲- بهنیافر، ابوالفضل و قنبر زاده، هادی (۱۳۹۵): ژئومورفولوژی‌کارست، مشهد، انتشارات نگاران سبز.

۳- پور اکبری، سجاد، کلانتری، نصرا...، مصلح، آرش و عقدکی، یاسر(۱۳۹۹): پتانسیل‌یابی منابع آب کارستی با استفاده از RS، GIS و AHP (مطالعه موردی: تاقدیس‌های لیلی و کینو در شمال شرق خوزستان). مجله مهندسی منابع آب، سال ۱۳، شماره ۲، صص۱۱۲-۹۹.

۴- ثقفی، مهدی، امیر احمدی، ابوالقاسم و ربیعی، مریم(۱۳۹۵): تشخیص واکنش‌های ژئومورفیک مخروطه افکنه های جنوب دشت بیرجند به فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات آب و هوایی با استفاده از داده‌های میدانی، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۵۵، صص ۱۱۴-۹۷.

۵- دشتی برمکی، مجید، رضایی، محسن و اشجاری، جواد(۱۳۹۴): پتانسیل‌یابی منابع آب کارست کوه‌های دوان و شاپور بر اساس تصمیم‌گیری چندمعیاره، مجله پژوهش آب ایران، شماره۱، صص۱۰۰-۸۹.

۶- رضایی عارفی، محسن، زنگنه اسدی، محمدعلی، بهنیافر، ابوالفضل و جوانبخت، محمد(۱۳۹۹): پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی:حوضه کوهستانی کلات، خراسان رضوی)، مجله جغرافیا، سال ۱۸، شماره ۶۴، صص۹۴-۷۹

۷- 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 سلسله مراتبیAHP و سنجش از دور و GIS، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۳، شماره ۳، صص ۱۴۴-۱۵۷.

۸- سپند، ساحل، چیت‌سازان، منوچهر، رنگزن، کاظم و میرزایی، یحیی(۱۳۸۶): تلفیق سنجش از دور و GIS در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی محدوده لالی، همایش ژئوماتیک تهران.

۹- صفاری، امیر، کیانی، طیبه و زنگنه تبار، ساسان(۱۳۹۸): بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۹، شماره ۵۵، صص۳۶-۲۳.

۱۰- علیزاده، امین(۱۳۸۹): اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ سیام، مشهد، ایران.

۱۱- قبادی، محمدحسین(۱۳۸۸): زمین‌شناسی مهندسی کارست، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۱۲- مزیدی، احمد، کرم، امیر و کوراوند، مژگان(۱۳۹۵): پتانسیل‌یابی توسعه کارست با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه دشت سوسن و دشت ایذه)، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۲، صص ۱۴۱-۱۳۰.

۱۳ -مکرم، مرضیه و نگهبان، سعید(۱۳۹۸): بررسی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن با استفاده از روش فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۳۰، شماره۲، ۱۳۴-۱۲۱

۱۴- محمودی، فرجا...، (۱۳۸۵): ژئومورفولوژی ساختمانی، چاپ هشتم، انتشارات پیام نور.

۱۵- نخعی، اعظم، زنگنه اسدی، محمدعلی، بهنیافر، ابوالفضل و گلی مختاری، لیلا(۱۴۰۲): پهنه‌بندی توسعه کارست در حوضه آبریز بقمچ کشف رود با مدل منطق فازی ANP. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۱۱، شماره ۴، صص۲۵۵-۲۳۰

۱۶- واعظی هیر، عبدالرضا، وفادار، مرتضی و آقایی، واحده(۱۳۹۷): پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی موجود در واحدهای کارستی و سازند سخت کوه مورو-صوفیان با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره AHP، SAW و F-AHP، مجله فضای جغرافیایی، سال ۱۸، شماره ۶۴، ۲۳۴-۲۱۵

۱۷- یمانی، مجتبی، شمسی‌پور، علی‌اکبر، جعفری اقدم، مریم و باقری سید شکری، سجاد (۱۳۹۲): بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی، استان کرمانشاه، مجله علوم زمین سال، شماره ۲۲، صص ۶۶-۵۷.

18- Abdelkareem, M., & Abdalla, F. (2022): Revealing Potential Areas Of Water Resources Using Integrated Remote-Sensing Data And GIS-Based Analytical Hierarchy Process. Geocarto International, 37(25), 8672-8696.

19- Calic, J., (2011): Karstic Uvula Revisited: Toward A Redefinition Of The Term, Geomorphology, Vol.134, No.1, Pp.32-42

20- Ford, D., & Williams, P. D. (2007): Karst Hydrogeology And Geomorphology. West Sussex, England: John Wiley & Sons

21- Hamdani, N., & Baali, A. (2020). Characterization Of Groundwater Potential Zones Using Analytic Hierarchy Process And Integrated Geomatic Techniques In Central Middle Atlas (Morocco). Applied Geomatics, 12(3), 323-335.

22- 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). 1553-1560.

23- Milanovic, P. J. (1981): Karst Hydrogeology. Colorado, CO: Water Resources Ublications

24- Lamoreaux, P.E., 2007, Karst: The Foundation For Concepts In Hydrogeology. Bull Eng Geol Environ, 51. Studies, Vol. 64, No.1, Pp. 23-33.

25- Ozcelik, M., & Sarp, G. (2018): Evaluation Of Sustainable Water Supply Alternatives In Karstified Rock Masses Using GIS And AHP Methodology For Antalya (Turkey) Urban Area. Environmental Earth Sciences, 77, 1-14

26- Palmer, A. N., (2007): Cave Geology: Dayton, Ohio, Cave Books, P. 454.22

27- Saaty, T.L., (1980): The Analytic Hierarchy Process, Mcgraw _ Hill, Inc., Reprinted By RWS Publications, Pittsburgh

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

29- White, W. B., (1988): Geomorphology And Hydrology Of Karst ،Oxford University Press. Quinlan, J, Groundwater Monitoring In Karst Terrains, EPA. 600/ X.