

صص ۹۶-۷۷

پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه با استفاده از منطق فازی

محدثه ایمانی*

دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

اعظم حیدری

دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۴

چکیده

بیش از ۲۵ درصد از جمعیت جهان در مناطق کارستی زندگی می‌کنند یا آب مورد نیاز خود را از منابع کارستی تأمین می‌نمایند. این مناطق نقشی حیاتی در تأمین و تغذیه آبخوان‌ها ایفا می‌کنند. در ایران، به‌ویژه در نواحی غربی کشور، مناطق کارستی از اهمیت ویژه‌ای در مدیریت منابع آب برخوردارند. استان کرمانشاه با مساحت حدود ۲۴،۹۵۳ کیلومتر مربع در غرب کشور و در گستره زاگرس واقع شده است و بخش قابل توجهی از آن از سازندهای کربناته تشکیل شده است. هدف این پژوهش، پهنه‌بندی کارست و ارزیابی میزان تحول آن در این استان است. پهنه‌های کارستی تأثیر قابل توجهی در تغذیه آبخوان‌ها دارند و شناخت عوامل مؤثر بر تحول آن‌ها، از اهمیت بالایی در مطالعات منابع آب کارستی برخوردار است. در این پژوهش، از روش منطق فازی به منظور پهنه‌بندی تحول کارست استفاده شده است. بدین منظور، داده‌های مختلف زمین‌شناسی، اقلیمی، ویژگی‌های طبیعی و توپوگرافی گردآوری و در محیط GIS پردازش شدند. سپس با به‌کارگیری توابع عضویت و انجام فرآیند نرمال‌سازی داده‌ها، مدل فازی برای تحلیل تغییرات کارستی اعمال گردید. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تحول کارستی در استان کرمانشاه در سه رده «کم»، «متوسط» و «زیاد» طبقه‌بندی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ۳۳ درصد از مساحت استان دارای تحول کم، ۳۱ درصد دارای تحول متوسط و ۳۶ درصد دارای تحول زیاد است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی کاربردی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب کارستی در استان کرمانشاه و سایر مناطق مشابه کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: استان کرمانشاه، پهنه‌بندی، کارست، منطق فازی

مقدمه

کارست به مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های ناشی از آن‌ها در پوسته و سطح زمین گفته می‌شود که عمدتاً به‌واسطه انحلال سنگ‌ها شکل می‌گیرند. این پدیده‌ها با تشکیل بازشدگی‌ها، تخریب و تجزیه ساختمان سنگ‌ها، ایجاد نوع خاصی از رژیم گردش آب، توپوگرافی ویژگی منطقه و در نهایت، شکل‌گیری شبکه زهکشی منحصربه‌فرد، نمایان

می‌شوند (میلانویچ، ۱۹۸۱). اصطلاح «کارست» برای توصیف چشم‌اندازهایی به کار می‌رود که دارای اشکال سطحی، غارها و سیستم‌های آب زیرزمینی خاص هستند. این چشم‌اندازها در سنگ‌های قابل حل مانند سنگ‌آهک، دولومیت، مرمر، ژئیس و نمک شکل می‌گیرند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). کارست، ناحیه‌ای با هیدرولوژی و مورفولوژی ویژه است که علت اصلی این ویژگی‌ها، حلالیت بالا، توسعه تخلخل ثانویه و تأثیر عوامل تکتونیکی در گسترش آن است (وال و همکاران، ۲۰۱۵). پهنه‌های کارستی به دلیل ویژگی‌های خاصی مانند انحلال‌پذیری بالا و واکنش متفاوت در برابر عوامل مورفودینامیک و مورفوتکتونیک، در پروژه‌های عمرانی نیازمند مطالعات دقیق و ویژه هستند (باکالوویچ، ۲۰۱۸). تحول کارست منجر به شکل‌گیری ناهمواری‌ها و اشکالی چون کارن (لاپیه)، دولین، چاله‌ها (جاماها)، غارها، پانورها (حفره‌های بلعده)، مغاره‌ها، چشمه‌های متناوب، رودخانه‌های گمشده و دشت‌های کارستی می‌شود. توپوگرافی ویژه مناطق کارستی ارتباط نزدیکی با زهکشی زیرزمینی و همچنین با ژئومورفولوژی و هیدرولوژی دارد (ویل و همکاران، ۲۰۱۱). عوامل و فرایندهای گوناگونی در تحول کارست نقش دارند؛ توپوگرافی، لیتولوژی و ویژگی‌های زمین‌شناسی به عنوان عوامل منفعل عمل می‌کنند و فرایندهای دیگری مانند زمین‌شناسی فعال، فرایندهای هیدرولوژیکی وابسته به اقلیم، انحلال زیستی مرتبط با محیط‌زیست و نیز فرایندهای ژئومورفولوژیکی مانند هوازدگی، شیب، آبراهه‌ها و یخبندان به طور فعال در توسعه اشکال کارستی مؤثرند (کالیک، ۲۰۱۱). از دیدگاه ژئومورفولوژیست‌ها، مناطق شگفت‌انگیزی که در سنگ‌های کربناته، دولومیتی و تبخیری شکل می‌گیرند، پدیده‌های کارستی یا مجموعه‌های زمین‌شناسی کارست حقیقی نامیده می‌شوند (لامورکس، ۲۰۰۷). حدود ۲۴ درصد از مساحت خشکی‌های جهان توسط سنگ‌های کارستی پوشیده شده است و هرگونه توسعه بر روی این اراضی مستلزم شناخت دقیق ژئومورفولوژی کارست است (بهنیافر و قنبر زاده، ۱۳۹۵). پهنه‌های کارستی از جنبه‌های مختلف حائز اهمیت‌اند؛ این مناطق نقش مهمی در تأمین و تغذیه آبخوان‌ها دارند. با توجه به اینکه منابع آب کارستی از مهم‌ترین منابع آب به شمار می‌روند، شناخت صحیح این پهنه‌ها می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تأثیر بسزایی داشته باشد (معمدی و همکاران، ۱۴۰۰). در سال ۲۰۱۳ میلادی، حدود ۲۵ درصد از جمعیت جهان از منابع آب کارستی بهره‌برداری می‌کردند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). سرزمین ایران به دلیل وجود نهشته‌های کربناته در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، از پهنه‌های کارستی شگفت‌انگیزی برخوردار است. در ایران، علاوه بر غارها، توسعه‌یافته‌ترین اشکال کارستی مانند پولیه‌ها و اشکال مینیاتوری کارستی در حوضه‌ها (مانند لاپیه‌ها) نیز مشهود است. سرزمین‌های کارستی از جنبه‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این موضوع برای کشوری مانند ایران که به‌ویژه به دلیل شرایط اقلیمی با کمبود منابع آب مواجه است، اهمیتی دوچندان دارد. در ایران حدود ۳۱ درصد از مساحت کشور را سازندهای کربناته تشکیل می‌دهند که ۵۴ درصد آن در ارتفاعات زاگرس واقع شده و نقش بسیار مهمی در تأمین آب شرب کشور ایفا می‌کنند (بهنیافر و قنبر زاده، ۱۳۹۵).

با توجه به اهمیت این موضوع، پژوهش‌های مختلفی در سطح ایران و جهان انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

نخعی و همکاران در سال ۱۴۰۲ در مقاله‌ای با عنوان (پهنه‌بندی توسعه کارست در حوضه آبریز بقمچ کشف‌رود با مدل ANP) به این نتیجه رسیدند که در حوضه بقمچ کشف‌رود حدود ۵۰ درصد منطقه دارای پتانسیل زیاد یا بسیار زیاد برای توسعه کارست است. مهم‌ترین عامل مؤثر، لیتولوژی با بیشترین وزن (۰,۲۳۳) بوده و عوامل فاصله از آبراهه و کاربری اراضی کمترین تأثیر را داشته‌اند. به‌طور کلی، لیتولوژی، بارش، دما و ارتفاع مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کارست زایی در این منطقه‌اند.

رضایی عارفی و همکاران در سال ۱۳۹۹ در پژوهشی با عنوان (پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی: مطالعه موردی حوضه کوهستانی کلات در خراسان رضوی) نشان دادند که در این حوضه، حدود ۱۹ درصد منطقه توسعه‌یافته، ۲۵ درصد متوسط، ۴۲ درصد کمتر توسعه‌یافته و ۱۴ درصد توسعه‌نیافته از نظر کارست است. لیتولوژی با وزن ۰,۵۳، مهم‌ترین عامل و کاربری اراضی با وزن ۰,۰۱، کمترین تأثیر را داشته است. به ترتیب، زمین‌شناسی، ارتفاع، توپوگرافی و فاصله از آبراهه اصلی‌ترین عوامل مؤثر در توسعه کارست منطقه بوده‌اند.

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 شمال غربی و جنوب شرقی منطقه دارای پتانسیل صددرصدی برای کارست هستند، در حالی که مناطق مرکزی کارست کمتری دارند و بخش‌هایی از شرق و غرب فاقد کارست‌اند. بررسی میدانی نشان داد که مدل از دقت بالایی برخوردار است و روش فازی روشی مؤثر و دقیق برای شناسایی مناطق با پتانسیل کارستی است.

ویلیام و فورد در سال ۲۰۰۷ به بررسی فرایندهای هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی در مناطق کارستی پرداختند و نتایج مهمی در خصوص تأثیر این فرایندها بر منابع آب زیرزمینی در سراسر جهان ارائه کردند. این پژوهش‌ها نشان دادند که فرایندهای کارستی تأثیری قابل توجه بر پایداری منابع آب زیرزمینی دارند.

تریلا و ویجولی در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ای به بررسی آهک‌های رفیعی ژوراسیک بالایی متعلق به سازند مونت پیاترا پرداختند و نتیجه گرفتند که شکستگی‌های کششی عامل مهمی در توسعه کارست هستند.

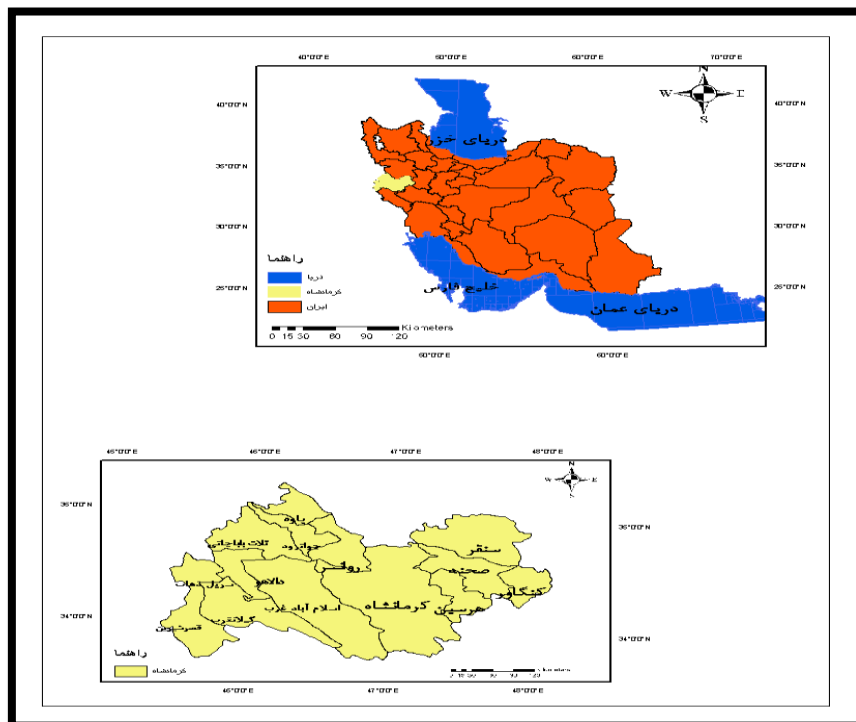
این پژوهش، با توجه به اهمیت پهنه‌های کارستی و نقش آن‌ها در پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه، دو هدف اصلی را دنبال می‌کند: نخست، شناسایی عوامل مؤثر بر ایجاد اشکال کارستی و دوم، پهنه‌بندی کارست در استان کرمانشاه. برای بررسی این عوامل که در تشکیل و تحول پهنه‌های کارستی نقش دارند، فرضیات اصلی پژوهش به این ترتیب مطرح شده است که بخش عمده پهنه‌های کارستی استان کرمانشاه در نواحی مرکزی گسترش یافته‌اند و زمین‌شناسی، به‌ویژه ترکیب سنگ‌شناسی، عامل کلیدی در توسعه کارست این منطقه به شمار می‌آید.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه استان کرمانشاه است که با وسعت تقریبی ۶۲۲,۲۴ کیلومتر مربع در میانه ضلع غربی کشور ایران قرار دارد. استان کرمانشاه از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۳۲ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این استان از شمال به استان کردستان، از جنوب به لرستان و ایلام، از شرق به همدان و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود. کرمانشاه در مسیر شمالی-جنوبی رشته‌کوه زاگرس و بر روی یال غربی آن واقع است. (شکل ۱) سلسله جبال زاگرس در این منطقه به شکل مجموعه‌ای از رشته‌کوه‌های موازی و دشت‌های مرتفع کوهستانی دیده می‌شود که بین دشت تاریخی بین‌النهرین و اراضی داخلی فلات ایران قرار دارند. به همین دلیل، عمده‌ترین گذرگاه‌های زاگرس در این استان قرار دارند. از نظر زمین‌ریخت‌شناسی، استان کرمانشاه به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش اول شامل منطقه کوهستانی و مرتفع با ارتفاعات طاقدیسی و دشت‌های ناودیسی است که عمده سطح استان را تشکیل می‌دهد. بخش دوم شامل مناطق قصر شیرین، نفت شهر و سومار می‌باشد که از کوه‌های فرسایش یافته و اراضی نسبتاً مسطح بین کوه‌ها تشکیل شده است. بلندترین نقطه استان، کوه شاهو با ارتفاع ۳۳۹۰ متر و پایین‌ترین نقطه آن با ارتفاع ۱۸۰ متر در منطقه سومار واقع شده است. بخش اعظم زاگرس از سازندهای کربناته تشکیل شده که با توجه به متغیرهای مؤثر در توسعه کارست، انواع کارست از اشکال ریز سطحی (میکروکارن‌ها) تا توسعه‌یافته‌ترین آن‌ها (پولیه‌ها، دولین‌ها و غارها) در زاگرس یافت می‌شود (باقری و همکاران، ۱۳۹۳). استان کرمانشاه به دلیل قرارگیری در زون زاگرس و رخنمون سازندهای کربناته، شرایط مساعدی برای فرآیندهای کارستی دارد و به همین علت، دارای ژئومورفولوژی کارستی توسعه‌یافته‌ای است. این ویژگی‌ها موجب شکل‌گیری سیستم‌های کارستی و فراوانی سراب‌ها و چشمه‌های کارستی در این منطقه شده‌اند. همچنین، پهنه‌های کارستی استان نقش مهمی در تأمین و تغذیه آبخوان‌ها ایفا می‌کنند (ملکی و همکاران، ۱۳۸۷). ناهمواری‌های استان کرمانشاه بخشی از رشته‌کوه زاگرس هستند که در طی دوران‌های مختلف زمین‌شناسی، به واسطه حرکت صفحه آفریقا-عربستان به سمت صفحه ایران و وقوع چین‌خوردگی در رسوبات دوران دوم و اوایل دوران سوم شکل گرفته‌اند. پس از تشکیل این ارتفاعات و چاله‌ها، عوامل فرسایشی مدام بر روی آن‌ها تأثیر گذاشته‌اند. چاله‌ها یا ناودیس‌ها از مواد آبرفتی ناشی از فرسایش انباشته شده و دشت‌های امروزی استان را به وجود آورده‌اند. جنس مواد تشکیل‌دهنده ناهمواری‌ها به‌طور عمده از نوع رسوبی و آهکی است که نمونه‌های بارز آن شامل کوه‌های بیستون و پرآو می‌باشد. در جنوب غربی استان، طبقات گچ به‌صورت گسترده‌ای مشاهده می‌شوند که از جمله در کوه‌های پیرامون گیلان غرب و قصر شیرین قابل مشاهده است. ناهمواری‌های اطراف شهرستان سنقر از نظر ویژگی‌های تشکیل و جنس سنگ‌ها با کوه‌های زاگرس تفاوت دارند. این ناهمواری‌ها به‌خودی‌خود قدیمی‌تر از رشته‌کوه‌های زاگرس هستند و در زمان چین خوردن و شکل‌گیری تحت تأثیر فعالیت‌های آتش‌فشانی و ماگمایی قرار گرفته‌اند. آب و هوای استان کرمانشاه به‌طور کلی بر اساس بررسی‌های هواشناسان، آمارهای سالانه و تجربیات محلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود:

الف) ناحیه‌های کوهستانی مرتفع که دارای آب و هوای معتدل و کوهستانی هستند. این مناطق تحت تأثیر ارتفاعات زاگرس قرار گرفته و معمولاً با دماهای مطبوع و بارش‌های مناسب همراه هستند؛

ب) ناحیه‌های پست و کم ارتفاع که عمدتاً در مناطق مرزی از گله تا قصر شیرین، سرپل ذهاب، گیلان غرب، نفت شهر و سومار واقع شده‌اند و آب و هوای گرم و نیمه‌خشک را تجربه می‌کنند. این نواحی به دلیل موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های زمین‌شناسی خود، شرایط گرم و خشک‌تری نسبت به نواحی مرتفع دارند.



شکل ۱. موقعیت استان در تقسیمات سیاسی کشور

داده‌ها و روش‌ها

این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های کتابخانه‌ای و اسنادی انجام گرفته است. در گام نخست، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با دقت ۳۰ متر و نقشه سیاسی استان، محدوده مورد مطالعه تعیین شد. همچنین با بهره‌گیری از همان مدل ارتفاعی، لایه شیب منطقه تهیه گردید. از نقشه‌های زمین‌شناسی و نقشه اشکال کارستی نیز به منظور شناسایی عوارض و سازندها استفاده شد. علاوه بر این، لایه رقومی گسل‌ها و نقشه‌های اقلیمی استان، شامل بارش و دما، به صورت دیجیتالی گردآوری شدند. در این پژوهش، با استناد به منابع معتبر (از جمله تصاویر رقومی سازمان نقشه‌برداری کشور) و با توجه به درجه اهمیت عوامل مؤثر در توسعه کارست در استان کرمانشاه، معیارهای اصلی انتخاب شدند. با توجه به نقش عوامل مختلف در توسعه کارست در گذشته منطقه، همچنین با در نظر گرفتن تفاوت پالئوکلیماتیک گذشته با وضعیت کنونی،

هفت لایه اطلاعاتی به‌عنوان لایه‌های کلیدی برگزیده شدند. بر اساس مطالعات صورت گرفته و نظر کارشناسان و مشاوران، عامل زمین‌شناسی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در توسعه کارست استان کرمانشاه انتخاب شد. طبق منابع مطالعاتی موجود، از میان عوامل مؤثر بر تحول کارست، در این پژوهش لایه‌های اطلاعاتی شامل فاصله از گسل، اقلیم (بارش و دما)، ارتفاع، شیب و اشکال کارستی به‌عنوان نقشه‌های عامل در نظر گرفته شدند. به‌منظور پهنه‌بندی تحول کارست، لایه‌های مذکور در محیط GIS فراخوانی شد. این لایه‌های اطلاعاتی با اعمال نظر کارشناسی و اختصاص وزن مناسب به هر لایه، به‌صورت نقشه‌های معیار طبقه‌بندی شدند و در نهایت، نقشه پهنه‌بندی تحول کارست منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. برای تهیه این نقشه، لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2 معرفی شدند. سپس این لایه‌ها به‌عنوان نقشه‌های معیار طبقه‌بندی گردیدند. با توجه به درجه اهمیت هر پارامتر، بر اساس روش توماس آل. ساعتی (۱۹۸۱)، رتبه‌ای از ۱ تا ۹ به آن‌ها اختصاص یافت. انتخاب این ارزش‌ها بر اساس نظر کارشناسی و شناخت دقیق منطقه صورت گرفت. پس از ارزش‌گذاری هر لایه با استفاده از روش AHP، وزن مناسب هر عامل که نشان‌دهنده میزان تأثیر آن در پهنه‌بندی تحول کارست است، مشخص شد. لازم به ذکر است که جمع وزن‌ها برابر با عدد ۱ در نظر گرفته شد. در ادامه، برای وزن دهی دقیق پارامترها، از نرم‌افزار EXPERT CHOICE که بر پایه روش تحلیل سلسله‌مراتبی طراحی شده است، بهره گرفته شد. پس از آن، نقشه‌های رستری هفت پارامتر مذکور در محیط GIS تولید و هر یک از آن‌ها به‌صورت طبقه‌بندی شده آماده گردیدند.

مدل منطق فازی

الگوریتم‌های منطق فازی، نخستین بار توسط پروفسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی شد و در دهه‌های بعد توسعه یافت. این الگوریتم‌ها که یکی از مدل‌های شبکه‌های عصبی به‌شمار می‌آیند، برای اقدام در شرایط عدم قطعیت طراحی شده‌اند. اساس تئوری فازی بر این است که داده‌های ورودی، با استفاده از توابع عضویت به درجاتی از عضویت در یک مجموعه فازی تبدیل می‌شوند؛ این درجات عددی بین صفر (عدم عضویت کامل) تا یک (عضویت کامل) دارند. در منطق کلاسیک، هر پدیده یا درست است یا غلط؛ اما در منطق فازی، طیفی از درستی نسبی بین این دو حالت در نظر گرفته می‌شود. برای مثال، اگر سیاه عدد صفر و سفید عدد یک باشد، رنگ خاکستری عددی میان این دو خواهد بود. این ویژگی منطق فازی را به ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری در شرایط مبهم و پر ابهام تبدیل کرده است؛ جایی که روش‌های کلاسیک و احتمالاتی پاسخ‌گوی پیچیدگی‌ها نیستند.

سیستم‌های فازی عموماً سه مرحله دارند:

- ۱- فازی سازی داده‌ها با تعریف توابع عضویت؛
- ۲- تدوین قواعد اگر-آنگاه برای ایجاد ارتباط میان ورودی‌ها و خروجی‌ها؛

۳- تجمیع نتایج و غیرفازی سازی با استفاده از عملگرهایی مانند AND، OR و NOT.

مدل های فازی برای تحلیل مسائل دارای عدم قطعیت ذاتی، مانند پهنه بندی تحول کارست، بسیار کارآمدند؛ زیرا در چنین پدیده هایی اثر عوامل کاملاً قطعی نیست و باید داده های کیفی و مبهم به صورت کمی بیان شوند. روش فازی ابزاری معتبر برای وزن دهی به لایه های اطلاعاتی و انجام مکان یابی است و نتایجی با دقت بالا و ریسک پایین ارائه می دهد (نصیری و همکاران، ۱۳۹۶). این روش در ژئومورفولوژی و علوم محیطی، به ویژه برای مدل سازی فرآیندهایی مانند فرسایش خاک، وقوع سیلاب و حرکات توده ای، کاربرد گسترده ای دارد و می تواند داده های نادقیق مانند بارش، شیب و جنس خاک را ترکیب کرده و نتایج را با درجات مختلف اطمینان ارائه دهد. همچنین منطق فازی در فناوری های نوین، از کنترل موتور خودروها و روباتیک گرفته تا لوازم هوشمند، سامانه های نظامی و مخابراتی، کاربردهای فراوانی دارد. در مدل های فازی، هر پیکسل نقشه مقداری بین صفر تا یک می گیرد که نشان دهنده میزان مطلوبیت آن مکان برای هدف مورد نظر است. این مقادیر با توابع عضویت تعیین می شوند و مفاهیم کیفی مانند «زیاد»، «متوسط» و «کم» به کمک اعداد فازی مثلی یا دوزنقه ای مدل سازی می شوند که این امر، تحلیل و تصمیم گیری چندمعیاره را دقیق تر و کارآمدتر می کند. از آنجا که اهمیت نقشه های معیار یکسان نیست، باید به هر کدام وزن اختصاص داد تا ارزش نسبی آنها در پهنه بندی مشخص شود. این وزن دهی دقت کار را بالا می برد و معمولاً بر اساس نظر کارشناسان و با در نظر گرفتن شرایط منطقه و پارامترهای مکانی انجام می شود. روش های وزن دهی به طور کلی به دو دسته تقسیم می شوند: دانش مبنا (تعیین وزن توسط کارشناس) و داده مبنا (استخراج وزن از داده ها). در ادامه، نقشه های معیار با درجات عضویت بین صفر تا یک ساخته شده و با عملگرهای فازی مانند اجتماع، اشتراک، ضرب، جمع و گاما، که متناسب با ویژگی های منطقه انتخاب می شوند، ترکیب می گردند (ناجی، ۱۳۹۷).

در این مطالعه، از توابع عضویت متنوعی که در محیط ArcGIS قابل پیاده سازی هستند، استفاده شده است. این توابع عبارتند از:

توابع Membership Function

این توابع بر اساس تئوری **Crisp set** و fuzzy set بنا شده اند. در تئوری **Crisp set** عضویت $\mu_{\tilde{A}}(x)$ از یک مجموعه بر روی دامنه ای از اعداد حقیقی عمل می کند و معمولاً اعداد صفر و یک را به عنوان خروجی ارائه می دهد. تئوری Fuzzy set تابع عضویت $\mu_{\tilde{A}}(x)$ از یک مجموعه بر روی یک دامنه از اعداد حقیقی عمل کرده و عموماً مقیاسی بین فواصل ۰ تا ۱ می دهد. توابع Membership Function شامل توابعی از قبل تعریف شده می باشند. این توابع به همراه شکل و نحوه عملکردشان در جدول ۱ نمایش داده شده اند.

جدول ۱. توابع Membership Function

نام	کاربرد	شکل	نام	کاربرد	شکل
Fuzzy gaussian	داده‌های ورودی را بر روی یک منحنی نرمال توزیع می‌نماید.		Fuzzy large	داده‌های ورودی با مقدار بیشتر، ارجحیت بیشتری دارند.	
Fuzzy linear	داده‌های ورودی را بر روی یک خط توزیع می‌نماید.		Fuzzy MS Large	Fuzzy مانند Large است. با این تفاوت که دارای میانگین و انحراف معیار است.	
Fuzzy near	داده‌های ورودی که به یک داده مشخص نزدیک باشند دارای ارجحیت بیشتری می‌باشند.		Fuzzy Small	داده‌های ورودی با مقدار کمتر، ارجحیت بیشتری دارند.	

تحلیل مدل منطق فازی

برای انجام تحلیل‌های مربوط به روش مدل منطق فازی، از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شد. مراحل مختلف این روش به شرح زیر است:

مقایسه زوجی

اولین قدم در این روش، تعیین معیارها برای انجام تحلیل است. پس از انتخاب معیارها، مرحله بعدی مقایسه زوجی آن‌ها می‌باشد که این کار با استفاده از نظرات متخصصان و کارشناسان و با توجه به جدول ارائه‌شده توسط ساعتی انجام گردید. در این مرحله، از متخصصان خواسته شد تا ارجحیت معیارها را با استفاده از مقیاس ساعتی، از عدد ۱ (کم‌اهمیت) تا عدد ۹

(بیشترین اهمیت) مشخص کنند. پس از تعیین ارجحیت معیارها، برای اطمینان از صحت تحلیل‌ها، نرخ سازگاری مقایسات محاسبه شد (جدول ۲).

جدول ۲. مقایسات زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به روش ساعتی (۱۹۸۰)

مقیاس	قضاوت
۱	برابر
۲	بین برابر تا متوسط
۳	متوسط
۴	بین متوسط تا زیاد
۵	زیاد
۶	بین زیاد تا خیلی زیاد
۷	خیلی زیاد
۸	بین خیلی زیاد تا فوق العاده زیاد
۹	فوق العاده زیاد

بررسی نرخ سازگاری

سازگاری قضاوت ذهنی را می‌توان با تخمین نسبت سازگاری، که مقایسه‌ای بین شاخص ثبات و شاخص سازگاری تصادفی است، بررسی کرد (جیسوال و همکاران، ۲۰۱۵). برای محاسبه نرخ سازگاری، از رابطه زیر استفاده شد. در این رابطه، CR نرخ سازگاری، CI شاخص ثبات و RI شاخص سازگاری تصادفی است. شاخص سازگاری، معیاری برای سنجش میزان سازگاری بوده که می‌توان آن را با استفاده از معادله زیر تخمین زد.

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

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

یافته‌های پژوهش

نتایج مدل منطق فازی

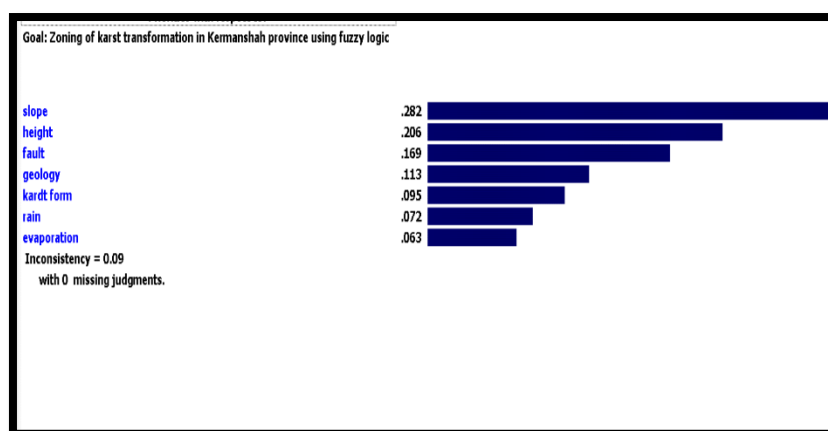
در ابتدا، پرسش‌نامه مقایسه زوجی پارامترهای مؤثر در پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه در اختیار متخصصان این حوزه قرار گرفت. پس از انجام مقایسه زوجی و مقایسه دوبه‌دوی معیارها با یکدیگر، وزن‌های مربوطه در نرم‌افزار Expert Choice وارد شد و وزن هر یک از معیارها مشخص گردید. نمودار ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در پهنه‌بندی تحول کارست نیز با استفاده از مدل منطق فازی در همین نرم‌افزار محاسبه شد. در نهایت، پس از تعیین وزن هر معیار، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2، لایه‌های مربوط به هر معیار با یکدیگر ادغام شده و نقشه پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه بر اساس مدل منطق فازی تهیه و ارائه گردید. (جدول ۳ و شکل ۲)

جدول ۳. وزن دهی عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه

عوامل	شیب	ارتفاع	گسل	جنس زمین شناسی	اشکال کارستی	بارش	دما
شیب	۱	۲	۲	۴	۳	۴	۲
ارتفاع	۱,۲	۱	۲	۴	۲	۲	۲
گسل	۱,۲	۱,۲	۱	۳	۳	۲	۲
جنس زمین‌شناسی	۱,۴	۱,۴	۱,۳	۱	۲	۲	۴
اشکال کارستی	۱,۳	۱,۲	۱,۳	۱,۲	۱	۲	۳
بارش	۱,۴	۱,۲	۱,۳	۱,۲	۱,۲	۲	۳
دما	۱,۲	۱,۲	۱,۳	۱,۴	۱,۳	۱,۳	۱

جدول ۴. وزن لایه‌های اطلاعاتی به روش AHP و اعمال نظر کارشناسی در استان کرمانشاه

وزن نهایی	نام لایه
۰.۲۰۲۰۶	شیب
۰.۱۵۹۱۱	ارتفاع
۰.۱۴۹۴۷	گسل
۰.۱۴۹۳۴	جنس زمین‌شناسی
۰.۱۲۶۸۹	اشکال کارستی
۰.۱۱۰۲۳	بارش
۰.۱۰۲۹	دما



شکل ۲. نمودار ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه طبق فرایند مدل منطق فازی

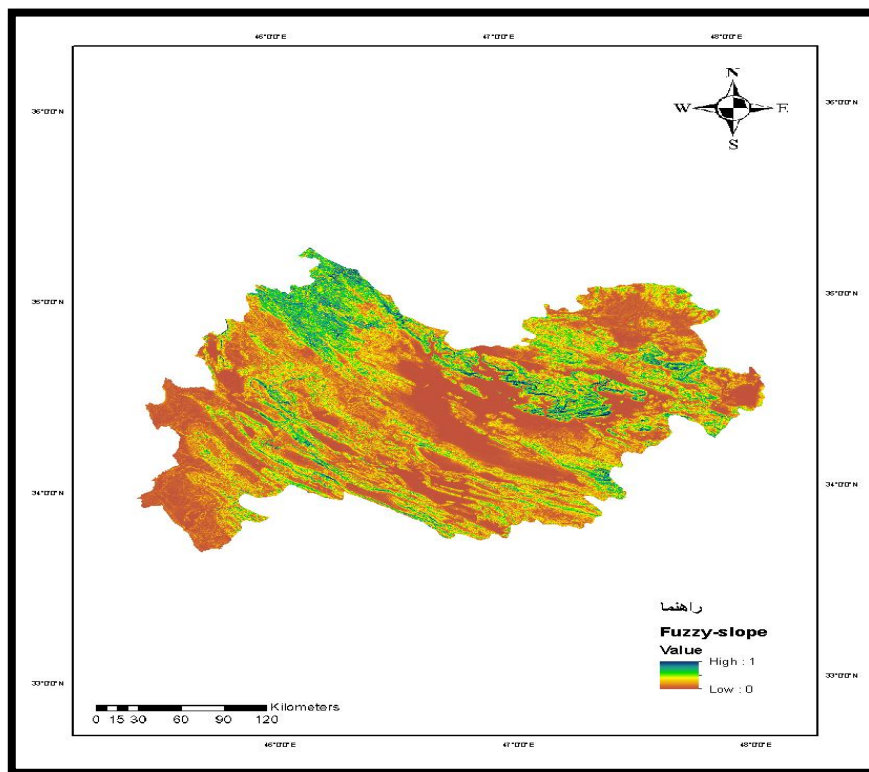
یافته‌های پژوهش

پارامترهای مؤثر در پهنه‌بندی تحول کارست

عامل شیب

شیب یکی از عوامل مهم در فرآیندهای کارستی است، زیرا بر حرکت آب‌های سطحی و زیرزمینی، انحلال و فرسایش تأثیر می‌گذارد. در مناطقی با شیب کم، آب‌ها به‌طور کندتری حرکت می‌کنند و ویژگی‌هایی مانند چاه‌ها و شکاف‌ها شکل

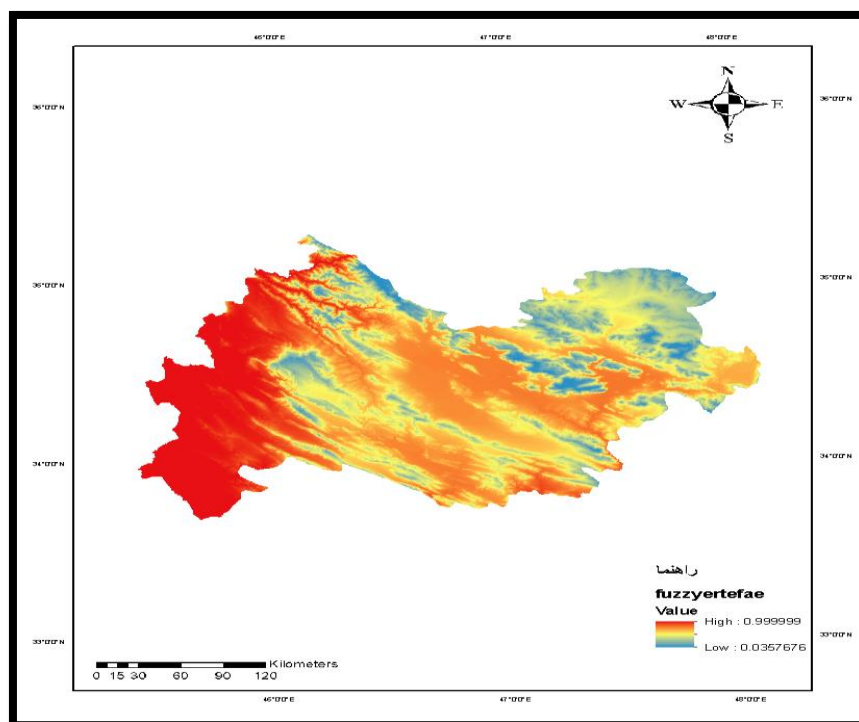
می گیرند. در شیب‌های متوسط، فرسایش و انحلال سریع تر رخ می دهد و در شیب‌های زیاد، حرکت سریع آب باعث شکل گیری ویژگی های کارستی بزرگ تری همچون غارها و دره ها می شود. بنابراین، شیب به عنوان یک عامل کلیدی در پهنه بندی تحول کارست انتخاب شده است. برای فازی سازی داده های شیب، از تابع عضویت گوسین استفاده شد. این تابع به طور خاص برای داده هایی با تغییرات تدریجی، مانند شیب زمین، مناسب است و می تواند مقادیر شیب را به درجات عضویت فازی بین ۰ و ۱ تبدیل کند. به این ترتیب، مقادیر شیب در مناطق مختلف به طور دقیق تر فازی سازی شدند و به جای مقادیر قطعی، مقادیر فازی که بیانگر احتمال تأثیر شیب در فرآیندهای کارستی هستند، به دست آمد. (شکل ۳)



شکل ۳. نقشه فازی شده شیب منطقه مورد مطالعه

عامل ارتفاع

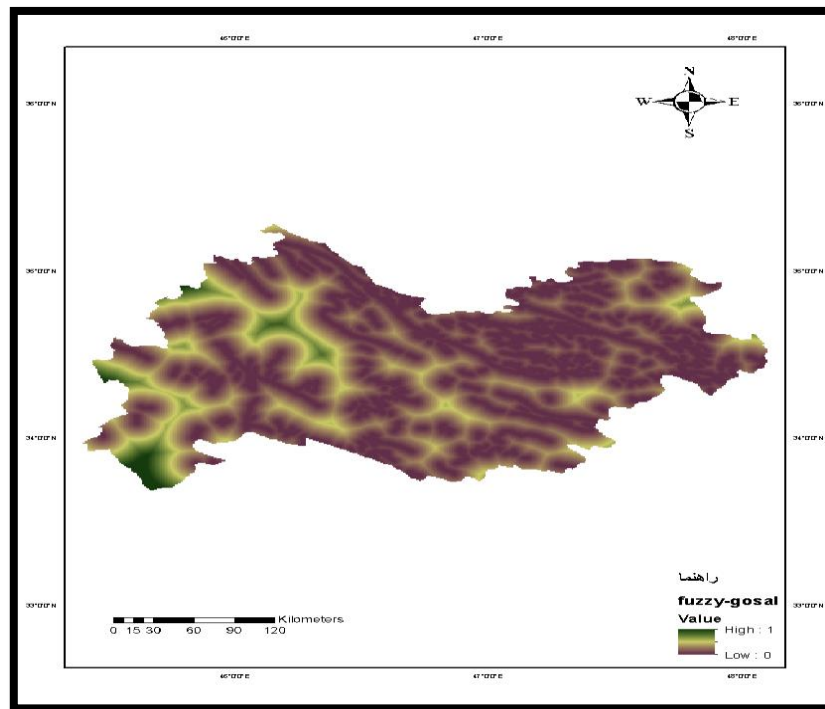
ارتفاع به عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر در پهنه بندی تحول کارست در استان کرمانشاه مورد استفاده قرار گرفت. ارتفاع به طور مستقیم بر فرآیندهای کارستی تأثیر می گذارد و می تواند الگوهای هیدرولوژیکی، تغییرات شرایط آب و هوایی و فرآیندهای فرسایشی را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج این تحلیل نشان داد که ارتفاع در کنار شیب، به ویژه در فرآیندهایی مانند فرسایش و تشکیل غارها، نقشی کلیدی ایفا می کند. ارتفاعات پایین تر، با توجه به شرایط هیدرولوژیکی و اکوسیستم های متنوع، معمولاً مناطقی با پتانسیل بالاتر برای تحول کارستی به شمار می آیند؛ در حالی که در ارتفاعات بالاتر، این پدیده ها با شدت کمتری رخ می دهند. (شکل ۴)



شکل ۴. نقشه فازی شده ارتفاع منطقه مورد مطالعه

عامل گسل

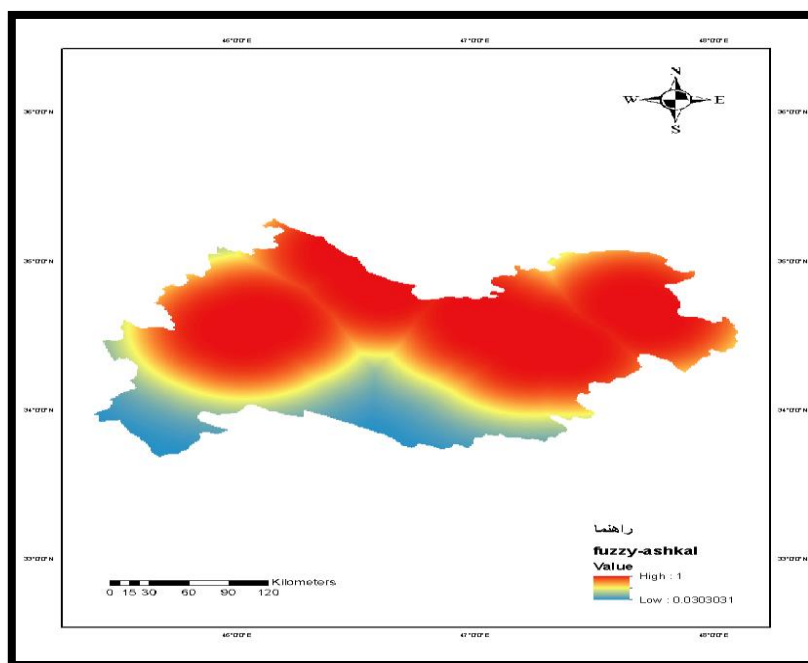
علت اصلی نفوذپذیری سنگ‌های کربناته، وجود درزه‌هایی است که امکان ورود و جریان یافتن آب را در داخل توده سنگ فراهم می‌کنند. طی فرآیندهای تکتونیکی، با ایجاد درزه‌ها در توده سنگی، کارستی شدن در جهات عمودی، افقی یا مایل گسترش می‌یابد و شکل‌گیری ساختارهای زیرزمینی مانند مجاری به هم پیوسته و تشکیل آبخوان‌های کارستی به سیستم درزه‌های موجود وابسته است (قبادی، ۱۳۸۸: ۴۶). گسل‌ها نیز به عنوان یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری ویژگی‌های کارستی، نقش بسزایی در فرآیندهای زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی ایفا می‌کنند. این ساختارهای تکتونیکی می‌توانند تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی منطقه ایجاد کنند و به‌ویژه در فرآیندهای تحول کارست مؤثر باشند. گسل‌ها نقشی چشمگیر در ایجاد و توسعه ساختارهای کارستی دارند؛ به‌ویژه در مناطقی که فعالیت تکتونیکی شدیدتر است. در این مناطق، شکاف‌ها و ترک‌های ناشی از گسل‌ها به‌طور مستقیم فرآیندهای انحلال و شکل‌گیری اشکال کارستی را تسهیل کرده و شرایط مناسبی برای گسترش ویژگی‌هایی مانند حفره‌ها و غارها فراهم می‌آورند. (شکل ۵)



شکل ۵. نقشه فازی شده گسل منطقه مورد مطالعه

عامل اشکال کارستی

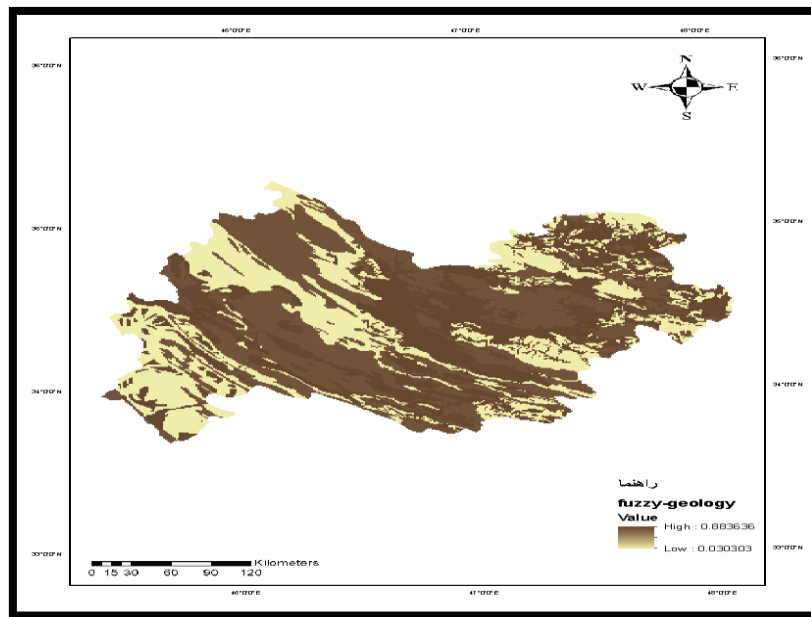
یکی از عوامل مهم در پهنه بندی تحول کارست، وجود اشکال کارستی در استان کرمانشاه است که تأثیر زیادی بر فرآیندهای کارستی دارد. نتایج این تحلیل نشان می دهد در مناطقی که اشکال کارستی، مانند غارها و حفره ها، فراوان تر هستند، فرآیندهای انحلال و سایر فرآیندهای کارستی به طور فعال تری جریان دارند. در این مناطق، به ویژه در مجاورت اشکال کارستی بزرگ تر و پیچیده تر، احتمال وقوع تحولات کارستی شدیدتر است. این فرآیندها می توانند منجر به شکل گیری ویژگی های کارستی جدیدی مانند حفره های عمیق تر، گسترش غارها و افزایش سرعت جریان آب های زیرزمینی شوند. (شکل ۶)



شکل ۶. نقشه فازی شده اشکال کارستی منطقه مورد مطالعه

عامل زمین‌شناسی

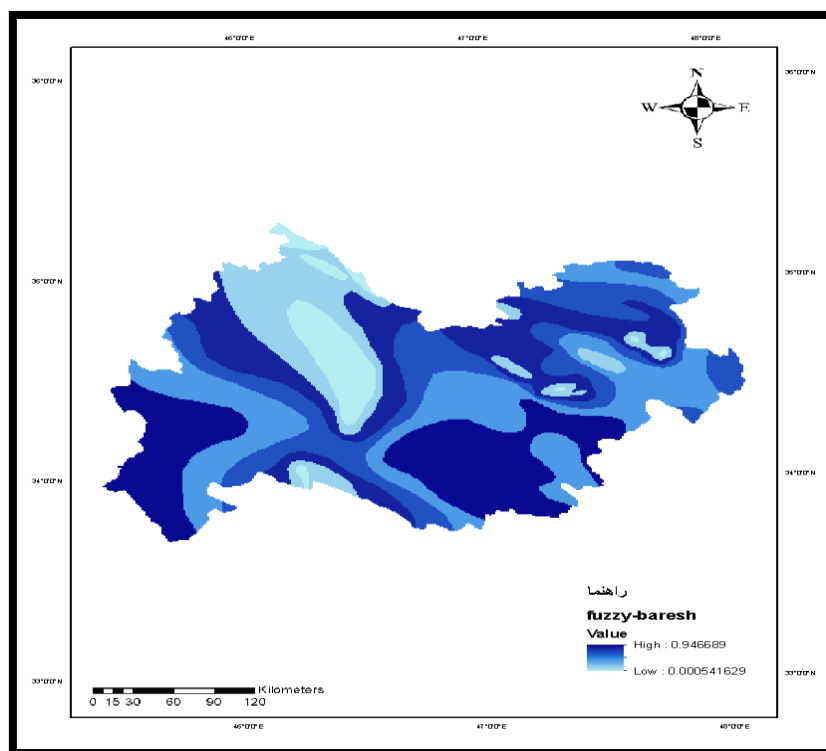
ویژگی‌ها نقش مهمی در شکل‌گیری و توسعه کارست دارند و با توجه به تفاوت‌های لیتولوژیکی موجود در مناطق مختلف، تأثیرات متفاوتی بر روند کارستی سازی خواهند داشت. بنابراین، بررسی دقیق این خصوصیات می‌تواند در شناخت بهتر شرایط و پتانسیل‌های کارستی منطقه مؤثر واقع شود. ویژگی‌های زمین‌شناسی به‌عنوان یکی از عوامل مهم در پهنه‌بندی تحول کارست مورد بررسی قرار گرفت. اثرات زمین‌شناسی بر تحول کارست در استان کرمانشاه به‌طور قابل‌توجهی فرآیندهای انحلال و تغییرات سطحی این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌ویژه سنگ‌های کربناته، مانند سنگ‌های آهکی، دولومیتی و سایر سنگ‌های رسوبی با ظرفیت بالای انحلال، در ایجاد ویژگی‌های کارستی نظیر غارها، چاه‌ها و حفره‌ها بسیار مؤثر هستند. در این نواحی، مقادیر فازی بالاتر به مناطقی اختصاص می‌یابد که سنگ‌های کربناته و مستعد انحلال بیشتری دارند؛ از این‌رو، فرآیندهای کارستی در این مناطق با شدت بیشتری رخ خواهد داد. (شکل ۷)



شکل ۷. نقشه فازی شده زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

عامل بارش

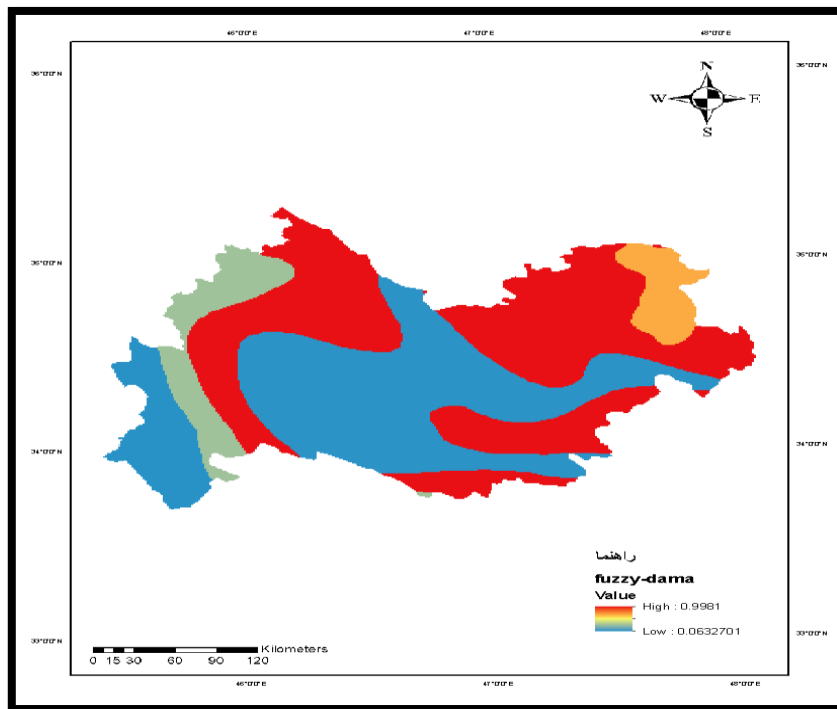
بارش یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه کارست به شمار می‌آید و در رأس این عوامل، اقلیم و میزان بارندگی قرار دارد. بارش به‌عنوان یکی از عناصر محیطی مؤثر بر فرآیندهای کارستی در استان کرمانشاه مورد توجه قرار گرفت؛ زیرا آب باران می‌تواند موجب انحلال سنگ‌های کربناته و در نتیجه، تشکیل حفره‌ها، غارها و دیگر ویژگی‌های کارستی شود. در مناطقی که میزان بارش بالا است، آب‌های سطحی و زیرسطحی بیشتری به داخل زمین نفوذ می‌کنند و این نفوذ موجب تسریع فرآیند انحلال سنگ‌های کربناته می‌شود. بنابراین، در این مناطق با بارش بیشتر، فرآیندهای کارستی معمولاً فعال‌تر بوده و ویژگی‌هایی مانند غارها، چاه‌ها و حفره‌ها به‌طور قابل توجهی گسترش می‌یابند. در مقابل، مناطقی که میزان بارش کمتری دارند، معمولاً کمتر تحت تأثیر فرآیندهای انحلال و کارستی قرار می‌گیرند؛ زیرا کمبود آب باعث کاهش فعالیت‌های هیدرولوژیکی و کاهش سرعت فرآیند انحلال می‌شود. از این‌رو، در نواحی با بارش کم، توسعه ویژگی‌های کارستی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. (شکل ۸)



شکل ۸. نقشه فازی شده بارش منطقه مورد مطالعه

عامل دما

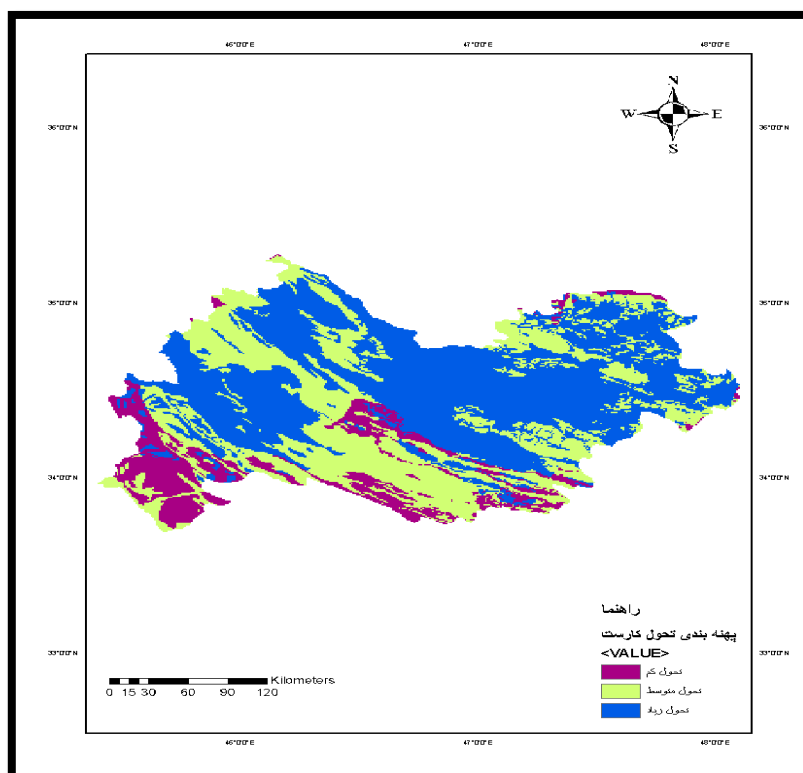
یکی دیگر از عوامل مهم در توسعه کارست، دما محسوب می‌شود. هرچه دما پایین‌تر باشد، امتیاز بالاتری در توسعه کارست دریافت می‌کند. افزایش دما موجب افزایش فعالیت‌های شیمیایی شده و فرآیند انحلال سنگ‌های کربناته را تسریع می‌کند. در این مناطق، به‌ویژه در فصول گرم‌تر، دما می‌تواند فرآیندهای کارستی را سرعت بخشد؛ زیرا آب باران یا آب‌های سطحی بیشتری قادر به نفوذ به سنگ‌های کربناته هستند و این امر منجر به ایجاد حفره‌ها و ویژگی‌های کارستی بیشتری می‌گردد. در مقابل، در مناطق با دمای پایین، فرآیندهای کارستی معمولاً کندتر پیش می‌روند؛ زیرا کاهش دما فعالیت‌های شیمیایی را کاهش داده و نفوذ آب به سنگ‌ها را محدود می‌کند. این شرایط موجب کندی فرآیند انحلال و به‌طور کلی کاهش توسعه ویژگی‌های کارستی می‌شود. (شکل ۹)



شکل ۹. نقشه فازی شده دما منطقه مورد مطالعه

نقشه نهایی پهنه‌بندی تحول کارست استان کرمانشاه

نقشه نهایی پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از لایه‌های رستری شیب، ارتفاع، گسل، اشکال کارستی، زمین‌شناسی، دما و بارش، همراه با ترکیب وزن‌های به‌دست‌آمده از روش منطق فازی برای هر لایه و همپوشانی آن‌ها با استفاده از دستور Raster Calculator تهیه شد. بر اساس اصول مبانی کارست و تحلیل‌های انجام‌شده، نقشه نهایی پهنه‌بندی تحول کارست در محدوده مورد مطالعه به سه طبقه: تحول کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی گردید. بر این اساس، پهنه با تحول کم حدود ۳۳ درصد، پهنه با تحول متوسط حدود ۳۱ درصد و پهنه با تحول زیاد حدود ۳۶ درصد از کل استان را شامل می‌شود (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد که عامل زمین‌شناسی مهم‌ترین نقش را در پهنه‌بندی تحول کارست در محدوده مورد مطالعه ایفا کرده است. (شکل ۱۰)



شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی تحول کارست در محدوده مورد مطالعه

جدول ۵. مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش منطق فازی

ردیف	طبقه	مساحت به کیلومتر مربع	درصد مساحت طبقات
۱	تحول کم	۵۸۴/۸۲۳۴	۳۳
۲	تحول متوسط	۵۱۸/۷۷۳۵	۳۱
۳	تحول زیاد	۱۸۲/۸۹۸۳	۳۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، هفت عامل مؤثر در پهنه‌بندی تحول کارست استان کرمانشاه شناسایی و مورد بررسی قرار گرفتند. این عوامل عبارتند از: سطوح ارتفاعی، شیب، گسل‌ها، اشکال کارستی، زمین‌شناسی، بارش و دما. با استفاده از روش منطق فازی، هر یک از این عوامل در تهیه نقشه پهنه‌بندی تحول کارست به کار گرفته شدند. برای محاسبه وزن نسبی معیارها و اعمال وزن دهی به عوامل دخیل در پهنه‌بندی، از روش‌های آماری بهره‌برداری گردید. این فرآیند با در نظر گرفتن نظرات کارشناسی و ارزیابی‌های تجربی انجام شد. ارزش‌گذاری و امتیازدهی به عوامل مختلف، بر اساس روش گذشته‌نگری و میزان حساسیت آن‌ها در طول سالیان گذشته صورت گرفت. همچنین، نظرات کارشناسی درباره مستعد بودن ذاتی عوامل، بدون توجه به شرایط گذشته، مدنظر قرار گرفت. در نتیجه، نقشه تحلیل سلسله‌مراتبی با استفاده از قضاوت کارشناسی و روش‌های قضاوت تجربی (شخصی)، به امتیازدهی و ارزش‌گذاری عوامل منجر شد. دقت نقشه‌ها و مدل فازی از طریق تحلیل داده‌ها و ارزیابی نتایج مدل به‌طور مؤثر تأیید گردید. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که در مناطقی با ویژگی‌های

خاص مانند سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت)، شیب‌های بالا و بارش‌های بیشتر، توسعه کارست به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین، مناطقی که دارای گسل‌ها و شکستگی‌های ژئومورفولوژیکی هستند، معمولاً تحول کارست بالاتری را نشان دادند. نتایج مدل فازی حاکی از آن بود که مهم‌ترین عامل مؤثر بر تحول کارست در استان، زمین‌شناسی و نوع سنگ‌ها است. سنگ‌های کربناته، به‌ویژه در مناطق مرکزی استان کرمانشاه، محیط مناسبی برای فرآیندهای کارستی فراهم کرده‌اند. در این مناطق، تأثیر سایر عوامل مانند ارتفاع و شیب نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ارتفاعات بالاتر و شیب‌های بیشتر شرایط بهتری برای توسعه کارست فراهم می‌کنند. علاوه بر این، بارش‌های فراوان در نواحی شمالی استان کرمانشاه نیز تأثیر چشمگیری بر گسترش فرآیندهای کارستی داشته است. دقت نقشه‌های فازی در شبیه‌سازی پهنه‌های تحول کارست در نواحی دارای سنگ‌های کربناته و شیب‌های زیاد، بسیار بالا ارزیابی شد. این دقت بالا به‌ویژه در مناطقی مشهود است که ویژگی‌های زمین‌شناسی و اقلیمی با فرآیندهای کارستی هم‌راستا باشند. با توجه به نتایج این پژوهش درباره پهنه‌بندی تحول کارست استان کرمانشاه با استفاده از منطق فازی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این مدل در سایر مناطق کشور با شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی متفاوت نیز به کار گرفته شود تا دقت و قابلیت تعمیم نتایج افزایش یابد. همچنین، استفاده از داده‌های دقیق‌تر مانند تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا و اطلاعات زمین‌شناسی جزئی‌تر می‌تواند موجب ارتقای دقت مدل شود. توجه به تأثیرات تغییرات اقلیمی بر فرآیندهای کارستی و شبیه‌سازی این تأثیرات با بهره‌گیری از مدل‌های فازی نیز توصیه می‌گردد. در نهایت، نتایج این پژوهش می‌تواند در مدیریت منابع آب زیرزمینی، حفاظت از اکوسیستم‌های کارستی و برنامه‌ریزی توسعه پایدار به کار گرفته شود و زمینه بهبود مدیریت منابع طبیعی را فراهم آورد.

منابع

- ۱- باقری سید شکری سجاد؛ یمانی مجتبی جعفر بیگلو منصور؛ کریمی، حاجی؛ مقیمی ابراهیم (۱۳۹۳): ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی مطالعه موردی آبخوان‌های کارستی گیلان غرب و خورین در استان کرمانشاه پژوهش‌های ژئومورفولوژی، کمی دوره ۲، شماره ۳.
- ۲- بهنیا فر، ابوالفضل، قنبر زاده، هادی (۱۳۹۴): کتاب ژئومورفولوژی کارست (فرآیند و فرم‌های کارستی فیکاسیون با رویکرد مدیریت کاربردی قلمروهای کارستی، معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد انتشارات نگاران سبز.
- ۳- رضایی عارفی، م.، زنگنه اسدی، م.، بهنیا فر، ا.، جوانبخت، ۱۳۹۹. شناسایی درجه کارستی شدن حوضه کوهستانی کلات در شمال شرق ایران، فصل‌نامه فضای جغرافیایی، پیاپی ۷۱ صص: ۷۴-۴۹.
- ۴- قبادی، محمدحسین، کرمی، رامین (۱۳۸۶): لزوم توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های کربناته در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی کارست (مطالعات موردی)، چهارمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست.

- ۵- معتمدی راد، م.، گلی مختاری، ل.، بهرامی، ش.، زنگنه اسدی، م.، 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 ۷۳-۹۳.
- ۶- مکرّم، 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، شماره ۲، ۱۲۱-۱۳۴.
- ۷- ملکی، ا. و شوهانی، د.، (۱۳۸۶): پهنه‌بندی و تحول کارست استان کرمانشاه با استفاده از Gis، مجموعه مقالات کنفرانس بررسی منابع آب استان کرمانشاه، انتشارات چشمه هنر و دانش، صص ۴۱-۶۰.
- ۸- ناجی دومیرانی، صادق؛ فخرآبادی پور، فرزانه؛ ساسان پور. (۱۳۹۷): تحلیل پهنه‌های مناسب توسعه اکو توریسم با استفاده از تلفیق مدل FUZZY-AHP مطالعه موردی: بخش ماهان. مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۸ (۲۹): صص ۹۱-۱۰۶.
- ۹- 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، صص ۲۳۳-۲۵۵.
- ۱۰- نصیری، بهروز، یارمرادی، زهرا، عباس نژاد، جواد. (۱۳۹۶): مکان‌یابی دفن زباله در شهر ماکو به روش فازی و بولین مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۷ (۲۴): صص ۷۸-۹۸.

- 11- Bakalowicz, M. (2018): Coastal Karst Groundwater In The Mediterranean: A Resource To Be Preferably Exploited Onshore, Not From Karst Submarine Springs. Geosciences, 8(7), 258.
- 12- Ford D. Williams, P., (2007): Karst Hydrology And Geomorphology. John & Sons, Ltd.
- 13- Jaiswal, R. K., Ghosh, N. C., Lohani, A. K., & Thomas, T. (2015): Fuzzy AHP Based Multi Criteria Decision Support For Watershed Prioritization. Water Resources Management, 29(12), Pp. 4205-4227.
- 14- Lamoreaux, P.E., 2007, Karst: The Foundation For Concepts In Hydrogeology. Bull Eng Geol Environ, ۵۱. Studies, Vol. 64, No.1, Pp. 23-33.
- 15- Milanović, T.P., 1981, Karst Hydrology. Translated By Aghasi, A.V. And Afrasiabian, A., Vol. 1.
- 16- Tirla, L., Vijulie, I., (2013): Structural-Tectonic Controls And Geomorphology Of The Karst Corridors In Alpine Limestone Ridges: Southern Carpathians, Romania. Geomorphology Journal, Vol.197, Pp. 123-136.
- 17- Saaty, Thomas L. (1980): The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw - Hill. ISBN 0-07-0543712.
- 18- Waele, J., Gutierrez, F., Audra, P., (2015): Karst Geomorphology: From Hydrological Functioning To Palaeo Environmental Reconstructions. Geomorphology, Vol. 229, Pp. 1-2.