

پهنه‌بندی قابلیت کارست زایی با استفاده از مدل منطق فازی (مطالعه موردی: منطقه نمک‌آبرود شهرستان چالوس)

عقیل مددی*، دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
طاہر همتی، دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

منطقه نمک‌آبرود در شهرستان چالوس استان مازندران قرار گرفته است. با توجه به گستردگی سازندهای آهکی، وجود گسل‌ها و درزهای زمین‌ساختی، این منطقه از قابلیت بالایی برای کارست‌زایی برخوردار است. هدف از این پژوهش پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی در این منطقه است. داده‌های اصلی پژوهش را نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی و نیز عکس‌های هوایی به همراه داده‌های آب‌شناسی وزارت نیرو تشکیل می‌دهد. در این پژوهش از ۶ عامل محیطی مؤثر در کارست‌زایی شامل: زمین‌شناسی، فاصله از درز و شکاف‌ها، توپوگرافی، شیب، بارش و درجه حرارت استفاده گردیده است. سپس این عوامل با استفاده از مدل منطق فازی در محیط GIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. در پایان، نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی با استفاده از اپراتور گامای ۰,۷ تهیه گردید. نتیجه تحقیق قابلیت بالای منطقه را در کارست‌زایی نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که از کل مساحت ۲۲۱,۶۳ کیلومترمربع منطقه مورد مطالعه، ۵۶,۶۵ درصد (۱۲۳,۳۳ کیلومترمربع) در پهنه با قابلیت کارست‌زایی بالا واقع شده است. درحالی‌که تنها ۱۷,۱۳ درصد (۳۷,۹۸ کیلومترمربع) در پهنه با قابلیت کارست‌زایی کم واقع شده است. در پایان با توجه با نتایج حاصل از مدل فازی استفاده از این‌گونه مدل‌ها می‌تواند در شناسایی مناطق کارستی و پهنه‌بندی این مناطق کمک قابل توجهی کند.

واژه‌های کلیدی

نمک‌آبرود چالوس، کارست‌زایی، مدل منطق فازی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS).

مقدمه

کارستی شدن عموماً در سنگ‌های رسوبی بیوژنیک، شیمیایی و بیوشیمیایی و اغلب در سنگ‌های کربناته همانند آهک و دولومیت رخ می‌دهد (گراوز و میمن، ۲۰۰۵: ۱۲۶-۱۱۵). واژه‌ی «کارست» به مجموعه‌هایی از فرآیندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از انحلال سنگ‌های آهکی گفته می‌شود که با تجزیه و تخریب ساختمان این سنگ‌ها، رژیم آب شناختی بی‌همتایی شکل می‌گیرد و به تشکیل لندفرم‌های ویژه‌ای می‌انجامد (وزارت نیرو، تماب، ۱۳۷۳: ۷۵). سرزمین ایران به دلیل وجود نهشته‌های کربناته در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی از پهنه‌های کارستی شایان توجهی برخوردار است؛ به‌طوری‌که علاوه بر غارها، توسعه‌یافته‌ترین اشکال کارستی یعنی پولیه‌ها و اشکال مینیاتوری کارستی در حوضه‌ها (مانند لایپه‌ها) نیز مشهود است (طاهری، ۱۳۸۴: ۳۲). به‌طور کلی رفتار و ساختار کارست را می‌توان از چند منظر مورد بررسی قرار داد. کارست را می‌توان منبع مناسبی برای تأمین آب در نظر گرفت. سرزمین‌های کارستی آب آشامیدنی ۲۵ درصد از جمعیت جهان را تأمین می‌کند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷: ۱). در مدیترانه و قسمت‌های جنوب شرقی آسیا، آبخوان‌های کارستی اصلی‌ترین منابع تأمین آب شرب را تشکیل می‌دهند (کریستوف، ۲۰۰۸: ۲۰۳). از منظر خطرات کارست باید به عملکرد مهندسی این پدیده توجه نمود. به هنگام احداث سازه‌هایی نظیر سد و تونل در مناطق کارستی، مسئله فرار آب از سد و هجوم آب به داخل تونل از جمله چالش‌هایی است که مهندسان با آن روبه‌رو هستند (میلانویچ، ۲۰۰۴: ۳۲). محیط‌های کارستی خاستگاه‌های کانسارهای فلزی و غیرفلزی زیادی هستند که عمدتاً به‌صورت پلاس در این محیط‌ها انباشته شده است. هم‌چنین بیش از ۵۰ درصد از نفت و گاز دنیا که از سنگ‌های کربنات استخراج می‌شود، با پدیده‌ی کارستی شدن ارتباط دارد (طاهری و رئیسی، ۱۳۸۹: ۴). کارست، از نظر فرهنگی نیز اهمیت دارد. غارها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست، پناهگاه‌های انسان‌های اولیه بوده است. بعدها از غارها برای ایجاد معابد و پرستشگاه‌ها به‌خصوص در جوامع هند و بودایی استفاده گردید (خانلری و همکاران، ۱۳۹۱: ۲). طویل‌ترین و عمیق‌ترین غارهای جهان که یکی از اشکال کارستی محسوب می‌شود، در توده‌های کارست تشکیل شده‌اند، در حال حاضر ۲۰ غار از عمیق‌ترین غارهای جهان در توده‌های کارستی فرانسه، اسپانیا، ازبکستان و گرجستان واقع شده است (باکالوویچ و همکاران، ۲۰۰۴: ۲۰۳). امروزه جاذبه‌های گردشگری سرزمین کارستی از ویژگی‌های مهم این مناطق محسوب می‌گردد. به‌عنوان مثال غارهای قوری‌قلعه (روانسر) و علی‌صدر (همدان) می‌توان به‌عنوان جاذبه‌های ژئوتوریسمی مرتبط با کارستی شدن نام برد که هرساله میزبان هزاران گردشگر داخلی و خارجی هستند. با توجه با این‌که بیش‌تر مساحت منطقه مورد مطالعه دارای پوشش گیاهی متراکم بوده و مانع شناسایی و بررسی علل تشکیل و توسعه‌ی اشکال کارستی به‌صورت مستقیم و در سطح وسیع گردیده و از طرفی به دلیل ویژگی گردشگری منطقه با شناسایی پهنه‌های کارستی و بیان علل شکل‌گیری این اشکال می‌توان کمک قابل توجهی در توسعه‌ی این صنعت نوپا در منطقه می‌گردد. هم‌چنین پهنه‌های کارستی به دلیل دارا بودن ذخایر آبی شیرین حائز اهمیت هستند؛ ضروری است که یک مدیریت همه‌جانبه در زمینه‌ی حفاظت و کنترل منابع آب کارست صورت بگیرد. چنین مدیریتی بدون شناسایی دقیق حوضه‌های کارستی و بررسی ژئومورفولوژی آن‌ها امکان‌پذیر نخواهد بود. در صورت شناسایی این پهنه‌ها می‌توان از منابع آبی این پهنه‌ها برای اهداف مختلف بهره‌برداری کرد. در این پژوهش، ابتدا پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی در منطقه تهیه گردید و سپس به بررسی و نقش عوامل مؤثر در پیدایش و تحول اشکال کارست پرداخته شده است. علاوه بر مطالعاتی که با اهداف شناسایی کارست در بسیاری از نقاط ایران

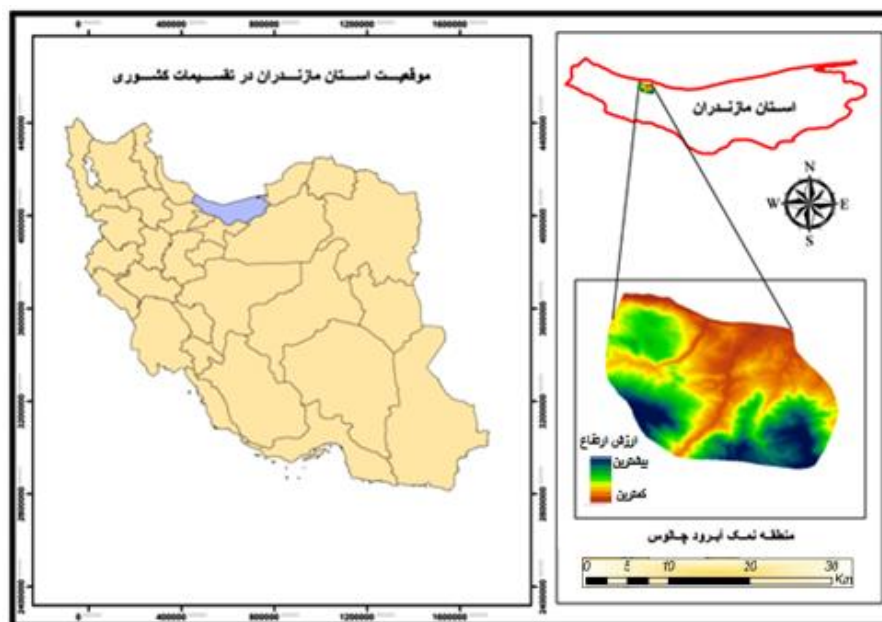
صورت گرفته است، تشریح و تبیین اشکال زمین و به عبارتی دیگر بررسی‌های ژئومورفولوژی نیز در مطالعات مربوط به اکتشاف آب‌های زیرزمینی نقش ویژه‌ای دارد. این امر در قلمرو سنگ‌های کارستی واضح‌تر است؛ زیرا میزان تحول اشکال توپوگرافی ارتباط مستقیمی با میزان انحلال آن‌ها دارد. به همین دلیل محققان اصولاً به تبع آب زیرزمینی در ارتباط با میزان توسعه‌ی فضاهای خالی در سنگ‌های کربناته توجه دارند که ارتباط نزدیکی با ژئومورفولوژی کارست دارد. ملکی و محمودی (۱۳۸۰) با مطالعه‌ی تحول کارست در کوه پراو- بیستون و نقش آن در تغذیه‌ی آبخوان‌های کارستی نشان دادند که ویژگی‌های زمین‌ساختی، زمین‌شناسی و اقلیم گذشته سبب توسعه و تحول کارست در منطقه شده و عوارض کارستی نقش زیادی در تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی دارند. عشقی و ثروتی (۱۳۸۳) به مطالعه‌ی ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی مناظر کارستی در حوضه‌ی کارده در کپه‌داغ پرداختند و دریافتند که وجود سازندهای آهکی و تخلخل ثانویه به صورت درز و شکاف مهم‌ترین عوامل در توسعه‌ی کارست منطقه هستند. ملکی و شوهانی (۱۳۸۶) به مطالعه و پهنه‌بندی کارست استان کرمانشاه با استفاده از GIS و مدل مفهومی AHP پرداختند و تراکم سطح، ارزش اطلاعاتی، روش تجربی و روش آماری را به عنوان متغیرهای تأثیرگذار انتخاب کردند. سپس متغیرهای ارتفاع، ترکیب سنگ‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی، دما، بارش، تبخیر و شیب و نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده از مناطق مختلف استان را از نظر درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست و نیز شرایط مساعد تحول کارست در اقلیم حاضر مشخص و در پایان مناسب‌ترین نقشه توسط مدل ارزش اطلاعاتی تهیه شده و همچنین ایشان به بررسی نقش زمین‌ساخت در تحول چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه با استفاده از روش رادار پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سراب باوری در زاگرس خردشده نسبت به سراب نیلوفر در زاگرس چین‌خورده به علت درز و شکاف بیش‌تر و وجود گسل، میزان انحلال بالاتر و تحول‌یافتگی بیش‌تری دارد. وحدتی و طاهری (۱۳۸۶) به دسته‌بندی ساختاری چشمه‌های کارستی حوضه‌ی الوند باختری استان کرمانشاه پرداختند. نتایج نشان داد که زمین‌ساخت با انواع ساخت‌های خطی و صفحه‌ای سبب ایجاد سامانه‌ی تنوع درز و شکاف در سازندهای کربناتی و با ایجاد تخلخل ثانویه سبب توسعه‌ی کارست در منطقه شده است. در ایران ژئومورفولوژی اشکال کارستی را محققان مختلفی بررسی کرده‌اند؛ از جمله، توزیع فضایی سنگ‌های کارستی در ایران (علایی طالقانی، ۱۳۸۳)، تحول کارست در منطقه زاگرس (علایی طالقانی و رحیم‌زاده، ۱۳۸۹) پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه (ملکی و همکاران، ۱۳۸۸)، اهمیت شناخت خصوصیات ژئومورفولوژیکی، سنگ‌شناسی و فیزیکی سنگ‌های کربناته (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰)، رابطه‌ی ساختارهای تکتونیک و اشکال کارستی در حوضه‌ی آبریز کارد (ولایتی و خان‌علیزاده، ۱۳۹۰)، توسعه‌ی کارست در توده‌ی پراو و بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپ بیوشیمیایی (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸)، استفاده از مدل ارتفاعی رقومی در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده‌ی پراو و بیستون (جعفری‌گلو و همکاران، ۱۳۹۰)، شناسایی مناطق مساعد آلودگی آب‌های زیرزمینی به کمک پهنه‌بندی کارست در استان کرمانشاه (ملکی، ۱۳۸۸) و نحوه‌ی تشکیل غار کتله‌خور در استان زنجان (رضایی و نخعی، ۱۳۸۷). در مورد محققان خارجی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: استون و همکاران (۱۹۹۴)، اندازه‌گیری میزان فرسایش کارستی با استفاده از کلر- ۳۶ در ساختارهای کلسیتی^۱ در استرالیا. راثو و همکاران (۲۰۰۹) از نقشه‌های هیدروژئومورفولوژی و هیدروژئولوژیکی برای محاسبه‌ی پتانسیل منابع آب در منطقه Visakhapatnam در هند استفاده کردند و

1- Calcite

پتانسیل منطقه را به کلاس‌های از خیلی فقیر تا خوب تقسیم کردند. چینی و مامو (۲۰۱۰) به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های عددی توان بازیابی منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک زمین را مورد مطالعه قرار داده‌اند. میشر و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و مشخصات ژئومورفیک پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوضه رودخانه‌ی باهما را تعیین نموده‌اند. اینکپن و همکاران (۲۰۱۲) به مدل‌سازی آثار تغییرات آلاینده‌های جوی بر میزان فرسایش سنگ‌آهک در لندن پرداختند.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی نمک‌آبرود چالوس با وسعت ۲۲۱٫۶۳ کیلومترمربع در محدوده‌ی استان مازندران قرار می‌گیرد. از لحاظ موقعیت ریاضی، این منطقه بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی قرار گرفته است. از لحاظ موقعیت نسبی، این منطقه در استان مازندران در محدوده‌ی شهرستان چالوس قرار دارد (شکل ۱). از نظر تقسیم‌بندی‌های زمین‌شناسی، منطقه‌ی مورد مطالعه در بخش شمال باختری رشته‌کوه‌های البرز مرکزی واقع شده و به جز بخش کوچک در مرتفع‌ترین بلندی‌های گوشه‌ی جنوب باختری، دیگر رخنمون‌ها با گیاهان و درختان جنگلی پوشیده شده‌اند. پوشش گیاهی و درختان جنگلی، بیشتر دشت‌ها، جلگه‌ها و ارتفاعات منطقه را پوشانیده‌اند. به‌طور کلی، روند افزایش ارتفاع از شمال به جنوب است. بلندترین ارتفاع منطقه‌ی مورد مطالعه ۱۹۴۸ متر از سطح دریا و پست‌ترین نقطه‌ی ارتفاع منطقه‌ی هم‌سطح با آب‌های آزاد در جلگه‌ها و دشت‌های شمالی دیده می‌شود. از نظر آب و هوایی بیش‌تر منطقه دارای شرایط اقلیم نیمه‌ی مدیترانه دارد و شمار روزهای خشک آن کم‌تر از ۴۰ روز در سال است. بارندگی در همه‌ی فصل‌های سال است، ولی شدت آن در پاییز است و در تابستان به کم‌ترین کاهش می‌یابد؛ بنابراین بخشی از سال را کم‌وبیش در خشکی به سر می‌برد. به‌طور نمونه ایستگاه‌های رامسر با حدود ۱۱۸۶ میلی‌متر و نوشهر با حدود ۱۱۵۵ میلی‌متر بارندگی سالیانه را به خودش اختصاص می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

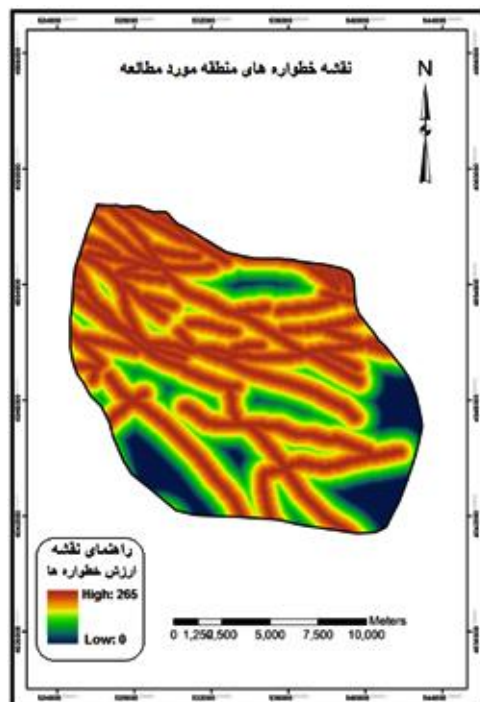
مواد و روش‌ها

با توجه به هدف تحقیق، از ۶ پارامتر طبیعی مؤثر در کارست‌زایی برای اجرای مدل استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از: بارش، دما، ارتفاع، شیب، سازندهای زمین‌شناسی و فاصله از درز و شکاف‌ها. جهت تهیه‌ی این لایه‌ها از داده‌های هواشناسی، لایه‌ی DEM منطقه با قدر تفکیک ۳۰ متر، نقشه توپوگرافی و زمین‌شناسی سازمان جغرافیایی ارتش و سازمان زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی در منطقه‌ی مورد نظر پس از مطالعه کتابخانه‌ای و مرور منابع مختلف، انتخاب پارامترهای مورد نظر، داده‌های مورد نیاز برای شاخص‌های مختلف از منابع متعددی استخراج شد. داده‌های مربوط به دما و بارش از آمار ایستگاه‌های سازمان هواشناسی استخراج شد و پس از اطمینان از صحت داده‌ها با استفاده از روش گریجینگ ساده درون‌یابی شد و با حصول از دقت آن‌ها، لایه‌های رقومی آن‌ها ایجاد شد. نقشه‌ی زمین‌شناسی و گسل‌های منطقه نیز با استفاده از نقشه‌ی زمین‌شناسی چالوس و رقومی‌سازی آن‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استخراج شد. استخراج شیب نیز با استفاده از مدل رقومی و با به‌کارگیری توابع استخراج شیب صورت گرفت.

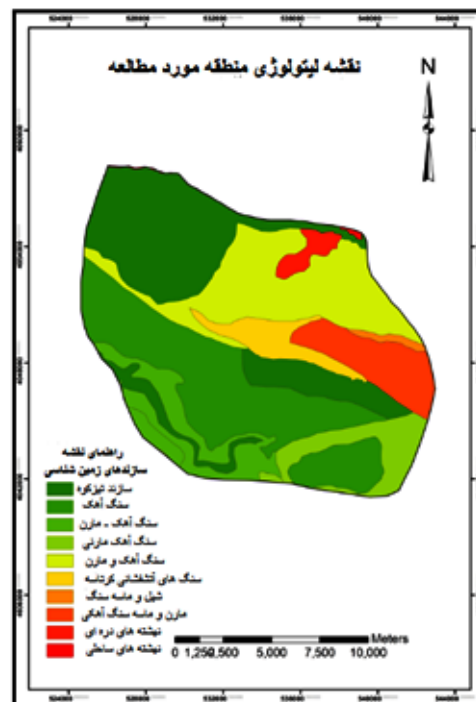
بحث و نتایج

لیتولوژی

در ارتباط با نقش لیتولوژی در کارست‌زایی؛ لیتولوژی و خصوصیات وابسته به آن نظیر بافت و درجه‌ی خلوص بر میزان کارست‌زایی تأثیر می‌گذارد. با توجه به شکل (۲) از میان سازندهای زمین‌شناسی موجود در منطقه، طبقات آهکی برای توسعه‌ی کارست مساعدتر از سایر سنگ‌های موجود است؛ از آهک‌های توده‌ای تشکیل شده است.



شکل ۳: نقشه خطواره‌های منطقه مورد مطالعه

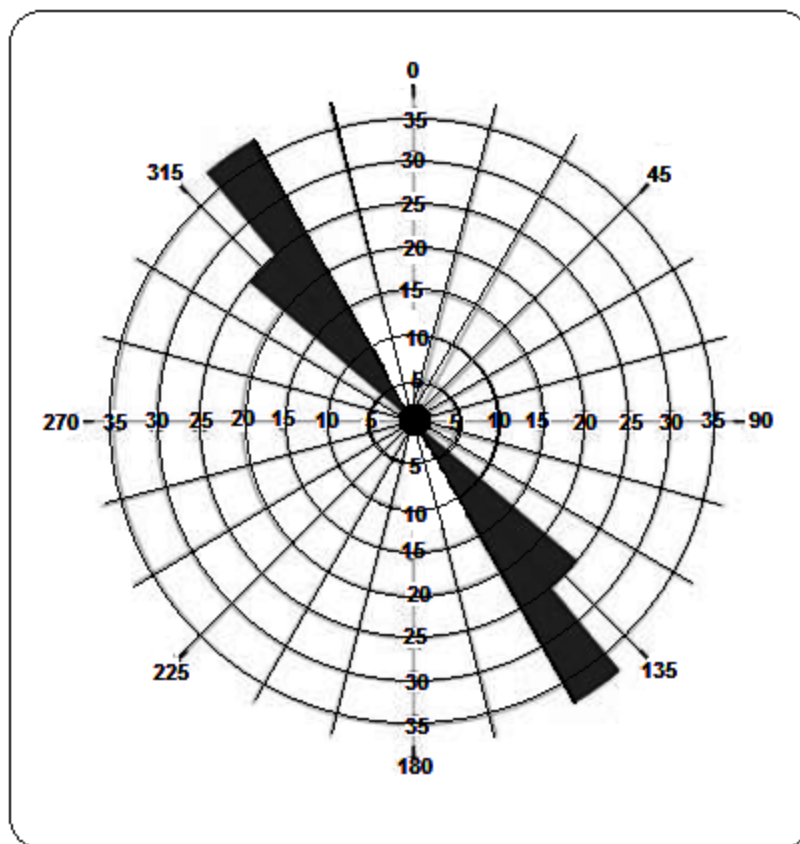


شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

با توجه به شکل (۲) بیش‌ترین نوع سازندهای منطقه از نوع آهکی است که از مهم‌ترین سازندهایی هستند که در آن‌ها فرآیند کارست‌زایی صورت می‌پذیرد.

فاصله از درز و شکاف‌ها (شکستگی‌ها)

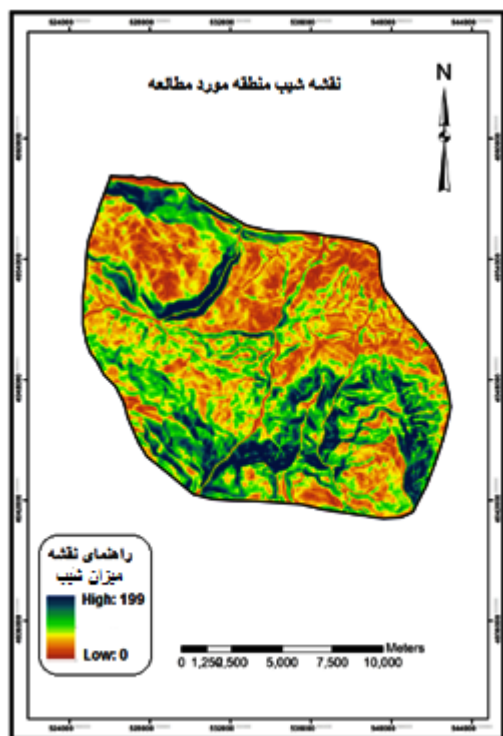
شکستگی‌ها و ساختارهای تکتونیکی که اصطلاحاً خطواره نیز نامیده می‌شوند، به دلیل ایجاد فضاهایی در سازندها و واحدهای زمین‌شناسی جهت عبور آب و حرکت آن به نقاط پایین‌تر درون زمین نقاط ضعفی تلقی می‌شوند که اهمیت آن‌ها در سازندهای سخت و آهکی بیش‌تر است. این پدیده به‌خصوص در سنگ‌هایی با تخلخل پایین نظیر سنگ‌های آهکی و کربناتی مؤثرتر هستند (محمودی، ۱۳۸۵: ۲۷). همان‌طور که در شکل (۲) مشخص شده تراکم شکستگی‌ها در منطقه‌ی بالا است که این تراکم معیاری برای خردشدگی سازند است. تراکم شکستگی‌ها بدین معنی است که تعداد درزه و شکستگی به ازای هر واحد طول در یک منطقه مدنظر است. افزایش تراکم درزه‌ها و گسل‌ها در منطقه، نقش مؤثری در نفوذ و انتقال آب زیرزمینی دارد؛ بنابراین به‌عنوان پارامتر مثبتی جهت پتانسیل توسعه‌ی کارست در نظر گرفته می‌شود. تحلیل خطواره‌ها در دیاگرام گل‌سرخ (شکل ۴) ارائه گردیده است که طبق این شکل جهت غالب آرایش خطواره‌ها شمال غرب- جنوب شرق است که این شکستگی‌ها از نوع عرضی و کششی هستند و در نتیجه موجب تراوایی بیش‌تر سازندهای سخت شده و نقش مهمی در هدایت و انتقال آب در منطقه ایفا می‌نمایند و از نظر هیدروژئولوژی حائز اهمیت هستند.



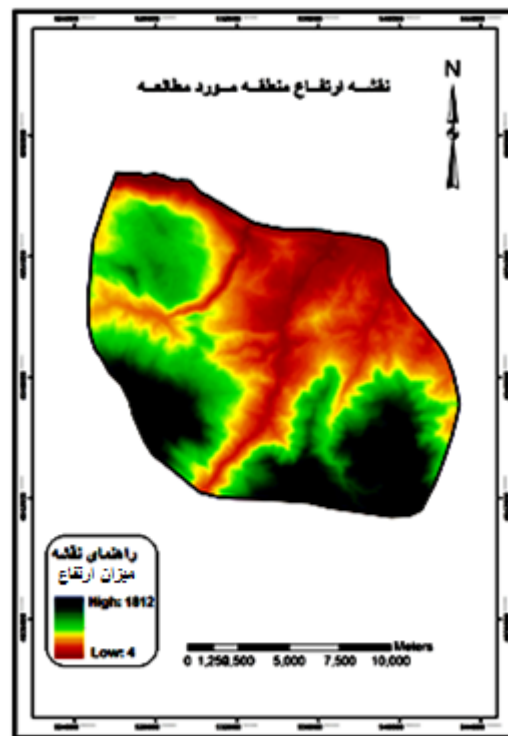
شکل ۴: نمودار گل‌سرخ (Rose diagram) شکستگی‌های منطقه مورد مطالعه (با توجه به دیاگرام گل‌سرخ، گسله‌ای غالب منطقه از نوع کششی بوده و قابلیت نفوذپذیری بالایی دارند)

ارتفاع و شیب منطقه

یکی از پارامترهای فیزیکی که نقش مؤثری در میزان وقوع بارندگی، تبخیر و تعرق، دما و پوشش گیاهی دارد، ارتفاع است. به‌طور کلی توپوگرافی نقش مؤثری در تغذیه و تخلیه و برون‌زد چشمه‌های کارستی دارد. با افزایش ارتفاع در یک منطقه، پتانسیل توسعه‌ی کارست به دلیل افزایش گرادیان هیدرولیکی، افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص شده، به دلیل قرار گرفتن منطقه مورد مطالعه در مناطق ساحلی از ارتفاع قابل ملاحظه‌ای برخوردار نیست؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین ارتفاع منطقه از ۱۸۱۲ متر بالاتر نیست. با توجه به شکل (۵) با افزایش فاصله از ساحل ارتفاع نیز افزایش می‌یابد و رابطه‌ی آن‌ها از نوع مستقیم است.



شکل ۶: نقشه میزان شیب منطقه مورد مطالعه



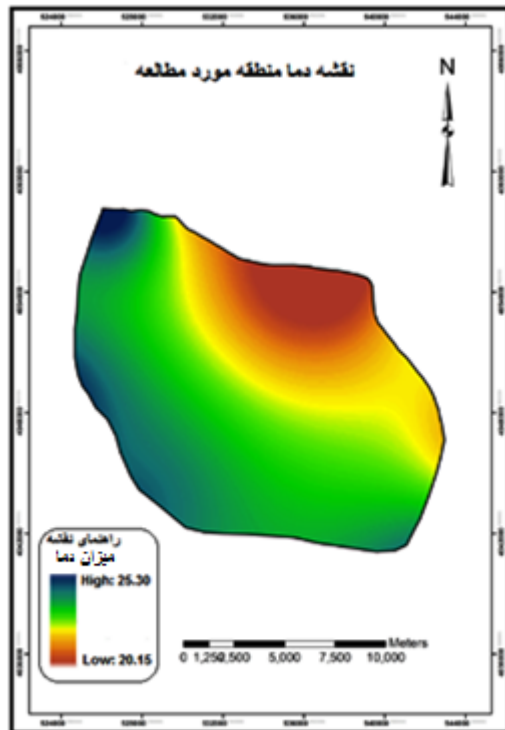
شکل ۵: نقشه میزان ارتفاع منطقه مورد مطالعه

شیب توپوگرافی یا شیب سطح زمین یکی دیگر از فاکتورهای توپوگرافی مؤثر است که گرادیان هیدرولیکی و جهت حرکت آب زیرزمینی را تعیین می‌کند. میزان شیب هم در میزان روان آب حاصل از بارش و هم در میزان نفوذ آب به داخل زمین و عمل انحلال توسط بارش نقش مؤثری ایفا می‌کند. با توجه به مبانی نظری، شیب‌های کم و مناطق مسطح بیش‌ترین پتانسیل را در کارستی شدن دارند. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود بیش‌ترین مساحت منطقه مورد مطالعه به دلیل واقع شدن در نواحی ساحلی، دارای شیب پایین است که این امر در کارست‌زایی منطقه مورد مطالعه مؤثر است.

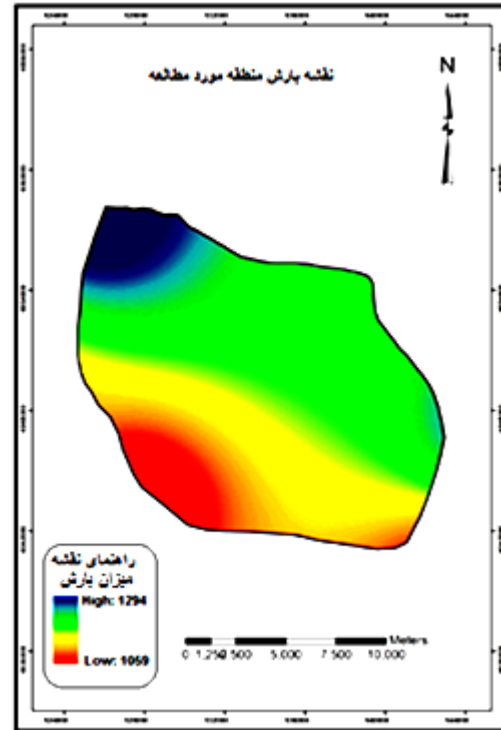
بارش و دما

بارندگی، منبع اولیه تأمین‌کننده آب زیرزمینی در هر منطقه است. ارتباط بارندگی با ایجاد آب زیرزمینی به‌وسیله‌ی فاکتورهایمانند توپوگرافی، پوشش گیاهی و لیتولوژی کنترل می‌شود. این فاکتورها بر مقدار آبی که به درون زمین نفوذ می‌کند، مؤثر هستند. با توجه به شکل (۷) بیش‌ترین میزان بارش منطقه مورد مطالعه ۱۲۹۴ میلی‌متر و کم‌ترین میزان آن نیز ۱۰۵۹ میلی‌متر است، نشان‌دهنده‌ی تغییرپذیری کم بارش در منطقه

است. همچنین محدوده موردنظر در پهنه‌ی پر بارش کشور واقع گردیده که بیش‌ترین بارش را در طول سال داراست و از طرف دیگر بیش‌ترین نوع بارش این محدوده از نوع باران است. این پارامتر در توسعه‌ی کارست و پتانسیل آب‌های کارستی نقش به‌سزایی دارد، اقدام به تهیه‌ی لایه‌ی اطلاعاتی بارش گردید (شکل ۷).



شکل ۸: نقشه میزان دمای منطقه مورد مطالعه



شکل ۷: نقشه میزان بارش منطقه مورد مطالعه

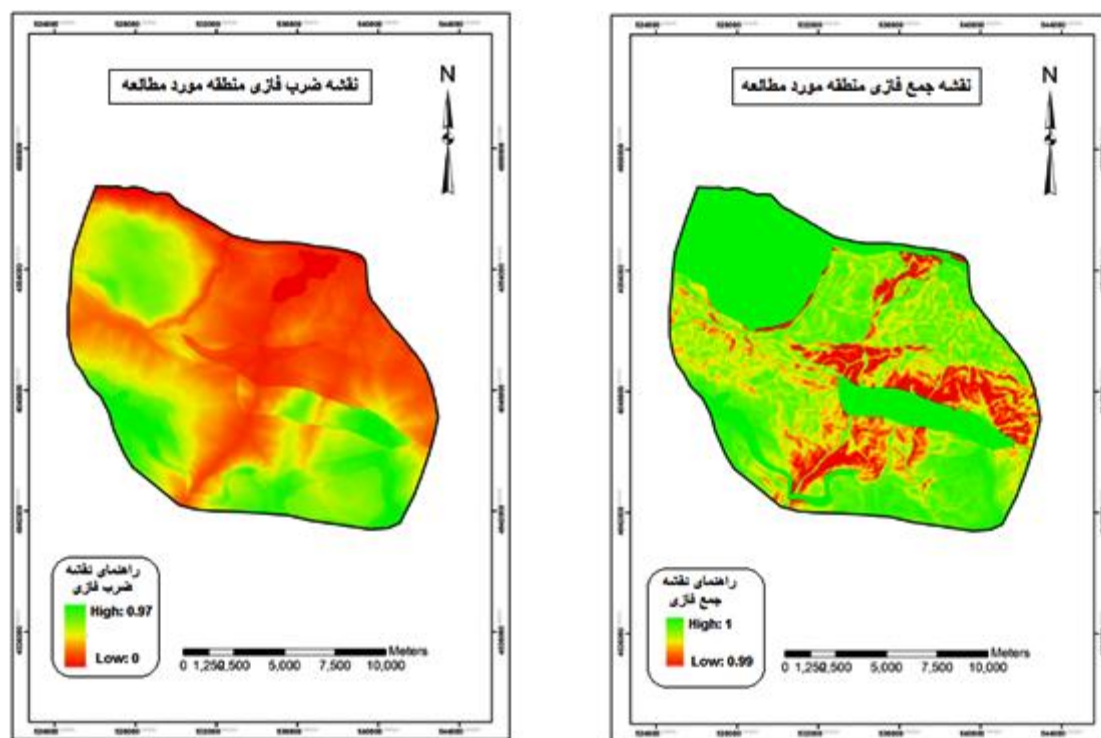
دما نیز از پارامترهای تأثیرگذار در ایجاد و توسعه‌ی اشکال کارستی است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده زمانی که دمای هوا کم است، تغییرات بارش تأثیر اندکی بر میزان انحلال کارست دارد، اما زمانی که دمای هوا به ۱۶ تا ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رسد با افزایش بارش میزان انحلال کارست به‌سرعت افزایش می‌یابد (شکل ۸). دمای منطقه مورد مطالعه از نظر دما فرآیند کارست‌زایی می‌تواند بیش‌تر در مناطق شمالی و شمال شرقی منطقه مورد مطالعه جایی که دارای درجه حرارت نزدیک به ۲۰ درجه باشد؛ نسبت به دیگر مناطق منطقه مورد مطالعه صورت می‌پذیرد. برای این‌که بتوانیم لایه‌ها را در مدل فازی مورد استفاده قرار دهیم، لازم است ابتدا تک‌تک لایه‌ها با توجه به اهداف موردنظر بر اساس توابع عضویت، فازی‌سازی شوند. با داشتن توابع فازی می‌توان با استفاده از برخی توابع موجود در نسخه‌ی ۱۰ نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی و یا به‌صورت فرمول‌نویسی در تحلیل‌گر Raster calculator لایه‌ها را به‌صورت لایه‌های استاندارد شده در بازه‌ی ارزشی صفر تا ۱ قرار داد. لایه‌های وکتوری پلی‌گونی نیز بدون نیاز به تابع با دادن کدهای بین ۰ تا ۱ و تبدیل به لایه‌های رستری به حالت فازی تبدیل می‌شوند. هرکدام از این لایه‌ها به‌تنهایی با توجه به ضابطه و نوع تابعی که برای آن در نظر گرفته شده است، قابلیت‌ها و محدودیت‌ها را در کارست‌زایی تعیین می‌کنند. تئوری منطق فازی برای اولین بار توسط پرفسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ در رساله‌ای به نام (مجموعه‌های فازی - اطلاعات و کنترل) معرفی شد. در تئوری کلاسیک مجموعه‌ها، یک عنصر یا عضو مجموعه است یا نیست (صفر و یک). تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را گسترش داده و عضویت درجه‌بندی شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. منطق فازی تکنولوژی جدیدی است که شیوه‌های مرسوم برای

طراحی و مدل‌سازی یک سیستم را که نیازمند ریاضیات پیشرفته و نسبتاً پیچیده است، با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و یا به عبارتی دانش فرد خبره و باهدف ساده‌سازی و کارآمدتر شدن طراحی سیستم، جایگزین و یا تا حد زیادی تکمیل می‌نماید (سلامی ۱۳۸۹: ۳۲). مدل فازی بر منطق فازی استوار بوده که اساساً به‌منظور اقدام در شرایط ابهام ارائه گردیده است. هر فرد هم‌زمان در مجموعه‌های مختلف، ولی به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک و نیز خود این دو حد را می‌پذیرد (وان آلفن، ۲۰۰۰: ۱۷۱۰). نظریه فازی از زمان ابداع تا به امروز به‌طور روزافزونی در حال گسترش بوده و کاربردهای گوناگونی پیدا کرده است. این تئوری در الگو کردن پدیده‌های فیزیکی، نقشه‌برداری و طبقه‌بندی به‌طور گسترده استفاده شده است (رستمی، ۱۳۸۷: ۲۲، خسروی ۱۳۸۲: ۴۳، اشقلی فراهانی، ۱۳۸۰: ۶۷). در تئوری مجموعه‌های دقیق اگر یک مجموعه را در نظر بگیریم، هر عضو مجموعه‌ی مرجع یا در مجموعه هست و یا نیست و می‌توان برای هر مجموعه A تابع زیر را تعریف کرد (مؤمنی، ۱۳۸۷: ۱۹۷).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , \text{If } x \in A \\ 0 & , \text{If } x \notin A \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

این تابع به هر عضو مجموعه‌ی (A) عدد ۱ و به هر عضو خارج از مجموعه‌ی (A) عدد صفر نسبت می‌دهد. یک مجموعه فازی توسط تابع عضویتی بیان می‌شود که این تابع عضویت درجه‌ی تعلق اعضای مجموعه را با یک عدد حقیقی بین [۰، ۱] نشان می‌دهد. به عبارت دیگر اگر عضویت عنصری در مجموعه‌ی A را در بازه‌ای از [۰، ۱] قرار دهیم، به هر x از X عددی در بازه‌ای از [۰، ۱] نسبت داده می‌شود و به این تابع، تابع عضویت گفته می‌شود و آن را به صورت $\mu_A(x)$ نشان می‌دهند که درجه عضویت بین (۰) و (۱) خواهد داشت. تابع عضویت برابر (۱) نشان‌دهنده‌ی عضویت کامل در مجموعه و مقدار (۰) نشان‌دهنده‌ی عدم عضویت کامل عنصر در مجموعه است؛ بنابراین، قبل از اجرای مدل فازی نیاز است که برای هر یک از لایه‌های اشاره‌شده در فوق توابع عضویت تعیین گردد و ارزش لایه‌ها در بازه‌ای بین [۰، ۱] قرار گیرد. پس از اعمال توابع به لایه‌ها، این لایه‌ها وارد مدل فازی می‌گردند. برای اجرای تکنیک فازی نیاز به عملگرهایی نظیر اجتماع، اشتراک، ضرب جبری، جمع جبری و گاما نیاز است. در این مطالعه از عملگرهای جمع جبری، ضرب جبری و گاما استفاده گردیده است. عملگر ضرب جبری موجب می‌شود تا اعداد مجموعه‌ها کوچک‌تر شده و به سمت صفر میل کنند؛ اما عملگر جمع جبری موجب می‌گردد تا اعداد به سمت یک میل نمایند. جهت تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب جبری و دقت خیلی کم عملگر جمع جبری عملگر دیگری به نام گاما شکل گرفته است. مقدار گامای تعدیل‌کننده بین صفر و یک است که مقدار آن از طریق قضاوت کارشناسانه تعیین می‌شود. گامای صفر معادل ضرب فازی و گامای یک معادل جمع فازی است (دادرسی سبزواری، ۱۳۸۷: ۲۳۳). به‌طور کلی، اجرای مدل فازی شامل سه مرحله است: مرحله اول، فازی‌سازی لایه‌ها یا تعیین و اعمال توابع عضویت بر لایه‌ها، مرحله دوم، اعمال عملگرهای جمع جبری و ضرب جبری بر لایه‌ها، مرحله سوم، اعمال عملگر گامای فازی جهت تعدیل حساسیت

بالای عملگر ضرب جبری و دقت کم عملگر جمع جبری. یکی از عملگرهای مهم منطق فازی، عملگر ضرب جبری فازی است که با استفاده از آن ترکیب لایه‌ها صورت می‌گیرد. در این اپراتور تمامی لایه‌های اطلاعاتی در هم ضرب می‌شود و در لایه خروجی اعداد به سمت صفر میل می‌کند که این روند ناشی از ضرب چندین عدد کمتر از یک است. در عملگر جمع جبری فازی نتیجه همیشه بزرگ‌تر یا مساوی بزرگ‌ترین مقدار عضویت فازی در لایه است. به همین دلیل در نقشه‌ی خروجی برخلاف عملگر ضرب جبری فازی ارزش پیکسل به سمت یک میل می‌کند. در این عملگر ابتدا عدد ۱ را از هر یک از لایه‌های فازی کم می‌کنیم و سپس تمامی لایه‌ها در هم ضرب می‌شوند، بعد از این مرحله، مجدداً عدد ۱ را از لایه‌ی نهایی کم می‌کنیم تا لایه‌ی جمع جبری فازی ایجاد شود (حسینی و همکاران، ۱۳۹۰: ۷۲) (شکل ۹ و ۱۰).



شکل ۱۰: نقشه ضرب فازی منطقه مورد مطالعه

شکل ۹: نقشه جمع فازی منطقه مورد مطالعه

برای تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی، عملگر دیگری بر حسب حاصل ضرب جبری فازی است. این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۳۹۰: ۷۳، شاد و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۵۳).

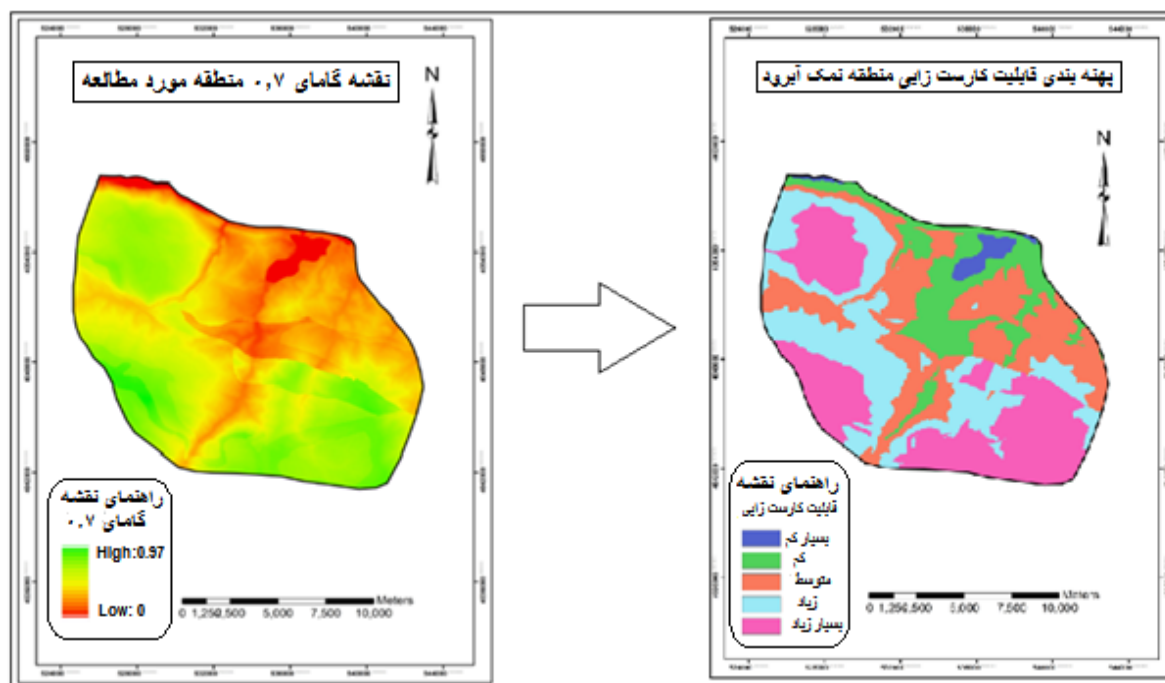
$$\gamma = (S_{\text{Combination}} * 1 - \gamma) (\text{Product}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه‌ی فوق $\mu_{\text{Combination}}$ لایه‌ی حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده‌ی صفر و یک است. وقتی γ برابر ۱ باشد، ترکیبی که اعمال می‌شود، همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد، ترکیب برابر ضرب جبری فازی است. انتخاب صحیح γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند که با افزایش جمع جبری و کاهش ضرب جبری فازی سازگاری دارد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۰: ۷۳). با توجه به مطالب بیان‌شده جهت پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی منطقه مورد مطالعه از عملگر گامای فازی استفاده شده است که

نقش تعدیلی نسبت به جمع و ضرب فازی دارد و حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی را تعدیل کرده و به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند.

نتیجه گیری

پس از تعیین عضویت برای هر یک از لایه‌های وابسته به پارامترهای مؤثر بر کارست‌زایی در منطقه نمک‌آبرود چالوس و اجرای مدل کارست‌زایی، نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی کارست‌زایی بر اساس گاما‌های ۰,۵، ۰,۷ و ۰,۹ به‌دست آمده است. به دلیل عدم وجود داده‌های میدانی جهت تعیین مناسب‌ترین گاما در پهنه‌بندی، مقدار همبستگی بین لایه‌های اطلاعاتی اولیه و نقشه‌های نهایی گاما در نرم‌افزار SPSS به دست آمد. نقشه‌ی گامای ۰,۷ بالاترین مقدار همبستگی را با لایه‌های اطلاعاتی اولیه داشته است؛ بنابراین گامای ۰,۷ به‌عنوان نقشه‌ی نهایی در پهنه‌بندی انتخاب گردید (شکل ۱۱). این نقشه‌ی متوسط گامای ۰,۹ و گامای ۰,۵ است که بر اساس متد شکستگی‌های طبیعی در پنج سطح طبقه‌بندی شده است (شکل ۱۱).

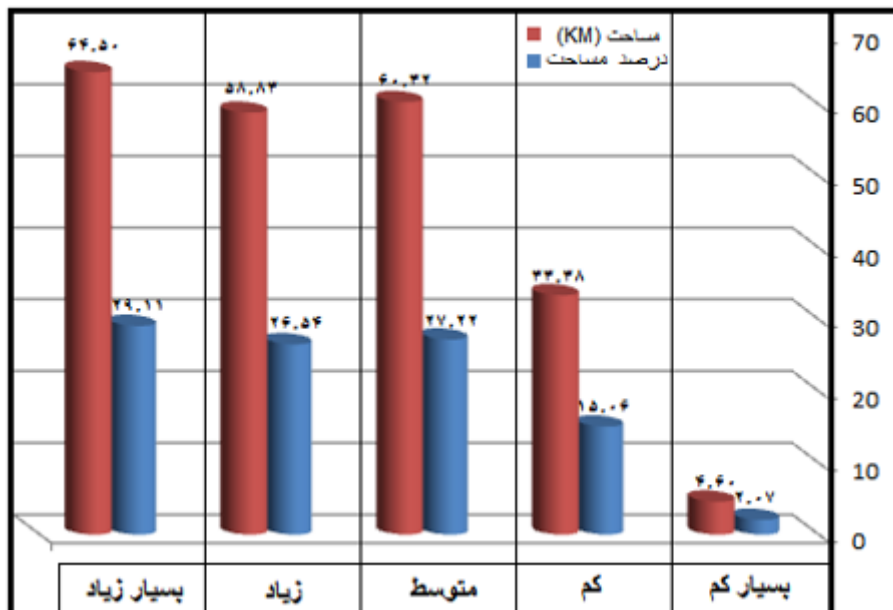


شکل ۱۱: نقشه پهنه‌بندی نهایی قابلیت کارست‌زایی منطقه نمک‌آبرود چالوس

جدول ۱: مشخصات مربوط به هر یک از طبقات در نقشه‌ی پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی منطقه

ردیف	قابلیت کارست‌زایی	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
۱	بسیار کم	۴,۶۰	۲,۰۷
۲	کم	۳۳,۳۸	۱۵,۰۶
۳	متوسط	۶۰,۳۲	۲۷,۲۲
۴	زیاد	۵۸,۸۳	۲۶,۵۴
۵	بسیار زیاد	۶۴,۵۰	۲۹,۱۱
۶	مجموع	۲۲۱,۶۳	۱۰۰

نمودار ۱: درصد و مساحت پهنه‌های منطقه مورد مطالعه



با توجه به نقشه نهایی، نمودار و جدول (شماره‌ی ۱) منطقه مورد مطالعه قابلیت بالایی برای کارست‌زایی و اشکال مربوط به آن را دارد؛ به‌طوری‌که ۵۶٫۶۵ درصد (۱۲۳٫۳۳ کیلومترمربع) محدوده مورد مطالعه در پهنه با قابلیت بالا قرار گرفته که ۲۹٫۱۱ درصد آن در محدوده‌ی بسیار زیاد و ۲۶٫۵۴ درصد آن در محدوده‌ی زیاد قرار گرفته است. پهنه‌های کم در منطقه مورد مطالعه مجموعاً ۱۷٫۱۳ درصد (۳۷٫۹۸ کیلومترمربع) است که از این مجموع تنها ۲٫۰۷ درصد یعنی ۴٫۰۶ کیلومترمربع در پهنه با قابلیت بسیار کم را به خود اختصاص می‌دهد. قابلیت بالای منطقه‌ی نمک‌آبرود برای تشکیل اشکال کارستیک بستگی به عوامل مختلف بیرونی و درونی دارد و بسته به غلبه‌ی هر یک از این عوامل اشکال خاص کارستیک در منطقه پدید می‌آید. از مهم‌ترین عوامل مورفودینامیک درونی ساختمان زمین‌شناسی است که باعث پیدایش اشکال سطحی کارست می‌گردد. مهم‌ترین عوامل بیرونی تأثیرگذار در منطقه ارتفاع ناهمواری‌ها، دما، میزان بارش و به‌ویژه شیب و درز و شکاف در منطقه است. نوع سازنده‌های زمین‌شناسی با غلبه‌ی سنگ‌های مستعد انحلال از نوع سنگ‌های آهکی و کربناته منجر به تشکیل اشکال کارستی در منطقه شده است. با توجه به شکل (۱۱) نهایی پهنه‌بندی با طبقاتی با درجات قابلیت کارست‌زایی بسیار کم تا بسیار زیاد، پهنه‌های با قابلیت کارست‌زایی بالا منطبق است بر بالاترین سطوح ارتفاعی پهنه‌هایی که از نظر اقلیمی و توپوگرافیکی از شرایط مناسبی برخوردار است. پهنه‌های با قابلیت کارست-زایی دارای نوع سازند زمین‌شناسی آبرفتی کواترنر است. از نظر اقلیمی پهنه‌هایی را شامل می‌شود که نسبت به دیگر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه کم‌ترین میزان بارش و بالاترین درجه تبخیر و دما را داشته است. با توجه به این‌که انحلال سنگ‌آهک در طبیعت بر اثر عمل گازکربنیک موجود در آب حاصل از نزولات جوی صورت می‌پذیرد؛ بنابراین در منطقه مورد مطالعه پهنه‌هایی که دارای بیش‌ترین میزان بارندگی نسبت به دیگر قسمت‌های منطقه را داشته، شرایط بهتری را از نظر قابلیت گسترش و تحول کارست را دارد. با در نظر گرفتن نقش دما در کارست‌زایی منطقه متناسب با تغییرات توپوگرافیکی، مناطق مرتفع که دارای دمای زیر صفر یا نزدیک به صفر درجه و نیز از نزولات جوی مناسب و تبخیر کم‌تری برخوردار است، نشانگر قابلیت بالای کارست‌زایی در منطقه

است. نقش نوع سازند زمین‌شناسی در کارست‌زایی محدوده مورد مطالعه بسیار مهم است؛ به‌طوری‌که پهنه‌های مربوط به سازندهای از نوع آهکی مانند سازند تیزکوه از قابلیت بهتری در کارست‌زایی منطقه برخوردار است.

منابع

۱. اشقلی فراهانی، عقیل (۱۳۸۰). ارزیابی خطر ناپایداری دامنه‌های طبیعی در منطقه‌ی رودبار با استفاده از تئوری فازی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت‌معلم تهران.
۲. حسینی، هاشم، کرم، امیر، صفاری، امیر، قنواتی، عزت اله، بهشتی جاوید، ابراهیم (۱۳۹۰). ارزیابی و مکان‌یابی جهات توسعه‌ی فیزیکی شهر با استفاده از مدل فازی (مطالعه‌ی موردی: شهر دیوان‌دره)، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۲۰، شماره‌ی ۲۳، صص ۸۳-۶۳.
۳. خانلری، غلامرضا، مؤمنی، علی‌اکبر (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعه‌ی فاکتورهای مؤثر بر توسعه‌ی کارست در منطقه‌ی گرین، غرب ایران، فصلنامه‌ی جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای، سال دوم، شماره‌ی ۳، صص ۷۳-۶۱.
۴. خسروی، شاهرخ (۱۳۸۳). آشکارسازی تغییرات ژئومورفولوژیکی محیط‌های ساحلی شمال غرب خلیج فارس (هندیجان) با استفاده از روش فازی و تکنیک‌های RS و GIS، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت‌معلم تهران.
۵. دادرسی سبزواری، ابوالقاسم (۱۳۸۷). مقایسه‌ی مدل منطق فازی با سایر مدل‌های مفهومی سازگار با GIS در مکان‌یابی مناطق مستعد سیلاب با کاربرد اطلاعات سنجنده‌ی ETM+، همایش ژئوماتیک تهران.
۶. رستمی، فرض الله (۱۳۸۷). اصلاح مدل برآورد رسوب ام پسیاک با به‌کارگیری تکنیک فازی در حوضه‌ی سد زاکرس، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت‌معلم تهران.
۷. سلامی، میثم (۱۳۸۹). تحلیل پارامترهای کیفی آب تالاب انزلی با استفاده از روش ریاضی فازی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت‌معلم تهران.
۸. شاد، روزبه، عبادی، حمید، مسگری، محمد سعدی، وفایی نژاد، علیرضا (۱۳۸۸). طراحی و اجرای GIS کاربردی جهت مکان‌یابی شهرک‌های صنعتی با استفاده از مدل‌های فازی، وزن‌های نشانگر و ژنتیک، نشریه‌ی دانشکده‌ی فنی، دوره‌ی ۴۳، شماره‌ی ۴، صص ۴۲۹-۴۱۷.
۹. طاهری، کمال (۱۳۸۴). گزارش عملکرد سالیانه‌ی دفتر مطالعه و تحقیقات کارست غرب کشور. شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه، معاونت مطالعات پایه‌ی منابع آب، آرشیو داخلی، صص ۴۵-۳۰.
۱۰. طاهری، کمال، رئیس‌ی، عزت‌الله (۱۳۸۹). منابع کارست ایران، مقدمه‌ای بر یک مفهوم. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.
۱۱. مؤمنی، منصور (۱۳۷۸). مباحث نوین تحقیق در عملیات، چاپ دوم تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۱۲. محمودی، فرج اله (۱۳۸۵). ژئومورفولوژی ساختمانی، چاپ هشتم، تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور.
۱۳. نبوی، محمدحسین (۱۳۵۵). دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، تهران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
۱۴. وزارت نیرو (تماب) (۱۳۷۳). فرهنگ چندزبانه واژه‌های کارست، تهران: انتشارات وزارت نیرو، سازمان تحقیقات منابع آب.
15. Van Alphen, B. J., & Stoorvogel, J. J. (2000). A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture. Soil Science Society of America Journal, Volume 64(5), pp 1706-1713.

16. Groves, C., & Meiman, J. (2005). Weathering, geomorphic work, and karst landscape evolution in the Cave City groundwater basin, Mammoth Cave, Kentucky. *Geomorphology*, Volume 67(1), 115-126.
17. Ford, Derek, Williams, Paul (2007) Karst hydrogeology and geomorphology. Academic Division of Unwin Hyman Ltd, 601.
18. Darnault, C. J. (Ed.). (2008). Overexploitation and Contamination of Shared Groundwater Resources: Management, (Bio) Technological, and Political Approaches to Avoid Conflicts. Springer Science & Business Media.
19. Milanovic, PT, (1981). Karst hydrogeology. Water resources pubs, Fort Collins, Colo.