

## پهنه بندی توسعه کارست در حوضه آبریز بقمج کشف رود با مدل منطق فازی- ANP

اعظم نخعی\* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری.  
محمدعلی زنگنه اسدی - دانشیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری.  
ابوالفضل بهنیا فر - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد.  
لیلی گلی مختاری - استادیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴      تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

### چکیده

هدف از این پژوهش شناسایی و پهنه بندی توسعه کارست در حوضه آبخیز بقمج در استان خراسان رضوی با استفاده از مدل فازی و (ANP) می باشد. در این تحقیق لایه های اطلاعاتی لیتولوژی، فاصله از گسل، همپاران، همدم، فاصله از آبراهه، شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی و کاربری اراضی به عنوان نقشه های عامل در نظر گرفته شدند. این لایه ها در محیط (GIS) تهیه و براساس نظر کارشناسان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با مدل (ANP) وزن دهی و استانداردسازی و در پایان با تلفیق مدل منطق فازی، نقشه ی نهایی پهنه بندی توسعه کارست با گامای ۰,۹ تهیه گردید. نتایج نشان داد 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 می باشد. عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰,۳۳۳ 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 داشته اند.

واژگان کلیدی: حوضه بقمج، پهنه بندی، توسعه کارست، مدل فازی- (ANP).

## مقدمه

کارست به سیمایی که در اثر خوردگی آب در سطح و زیرزمین ایجاد می شوند و شامل همه اشکال، فضاهای خالی، ناهمواریها و پدیده هایی که در سازندهای زمین شناسی انحلال پذیر می باشد، گفته می شود (ولایتی، ۱۳۹۴: ۷). این اصطلاح برای نوع خاصی از چشم اندازها به کار می رود که دارای اشکال سطحی و سیستمهای آب زیرزمینی می باشند. این اشکال در سنگهای قابل حل مانند سنگ آهک، دولومیت، ژیبس و نمک بوجود می آیند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷: ۲). از نظر تعریف، چشم اندازهای ژئومورفولوژیکی حاصل انحلال و فروریزش سنگ های کربناته، تبخیری ها و سیلیکات ها بر اثر آب های جوئی است به طوری که اشکال متنوعی از سنگ چاله ها، غارها، چشمه ها و سایر مناظر توپوگرافیک بر اثر گردش آب در درون توده سنگ، در این گروه از سنگ ها به وجود می آید. این ناهمواری های سه بعدی، نتیجه عملکردهای متقابل اقلیمی، لیتولوژیک، تکتونیک، توپوگرافی، هیدرولوژیک و بیولوژیکی می باشد. بنابراین در اثر انحلال تکامل یافته سنگ و توسعه زیاد تخلخل ثانویه سرزمین هایی با ویژگی های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی خاص به وجود آمده که به آن کارست گفته می شود (بهنیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۵: ۲). اصطلاح کارست همچنین به رفتار هیدرولوژیکی خاص مناطق کارستی اشاره دارد. مناظر کارستی و سفره های زیرزمینی ناشی از تعامل شدید آب و سنگ در دوره های زمانی طولانی است (هارتمن و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴: ۲) تشکیل فرم های کارستیک و فرایند کارستیفیکاسیون در نتیجه تاثیر مجموعه ای از عوامل می باشد که هرچه اندازه شدت این عوامل کارست زا یا فرایندها بیشتر باشد، درجه تکامل یافتگی توده کارست نیز بیشتر می باشد. از میان فرایندهای کارستی شونده، فرایندهای انحلالی در سنگها، فرایندهای زمین شناسی و لیتولوژیکی، فرایندهای ژئومورفولوژیکی در توده های کارستی، شرایط اقلیمی، فرایندهای هیدرولوژیکی و فرایندهای بیولوژیکی و زیستی نقش اساسی دارند (بهنیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۵: ۹۶). آبخوانهای کارستی، مخازن زیرزمینی بوده که آب را در شبکه ای از درزه و شکافهای به هم پیوسته، غارها و کانالها ذخیره می کنند (میلانویچ<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴: ۲۱۷).

گسل ها و شکستگی ها کانال های اصلی برای جریان آب زیرزمینی در سازندهای کارستی را فراهم می کنند (چن<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۰: ۲) کارست یک سیستم بسیار پویا است و به دلیل پیچیدگی آن ساخت و ساز پروژه های آبی بزرگ، از جمله سدها و مخازن، در این مناطق مشکل ساز می باشد (رومانو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۸). سفره های کارستی حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد از آب آشامیدنی جهان را تامین می کنند. در بسیاری از مناطق، سفره های کربناته به عنوان یک منبع آبی منحصراً به فرد در نظر گرفته می شود (اسکندری و همکاران، ۲۰۲۲: ۲) پهنه های کارستی از جنبه های مختلف اهمیت دارند، این مناطق نقش مهمی در تأمین و تغذیه ی آبخوانها دارند. با توجه به اینکه منابع آب کارستی از مهمترین منابع آب به شمار میروند، شناخت صحیح این پهنه ها، میتواند در توسعه پایدار فعالیتهای اجتماعی و اقتصادی یک منطقه، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، نقش بسزایی داشته باشد (معتمدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۷۴). بنابراین شناخت عوامل مؤثر در تحول کارست و پهنه بندی تحول آن در زمینه مطالعات مربوط به منابع آب کارست دارای جایگاه ویژه ای هستند (صفاری و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۴). شناخت مناطق تغذیه در آبخوانهای کارستی نقش کلیدی در شناخت ویژگی های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی آبخوانها و همچنین مدیریت و بهره برداری علمی و بهینه از آنها دارد (قدیمی و زنگنه تبار، ۱۳۹۸: ۱).

1. Ford & Williams

2. Hartmann et al.

3. Milanovic

4. Chen

5. Romanov

اهمیت پهنه‌های کارستی طی دو دهه اخیر آشکارتر شده است و از جمله کاربرد غارشناسی و مطالعات مربوط به آن در آب‌شناسی و جنبه‌های ژئوهیدرولوژی و کیفیت شیمیایی آب موجود در غارهای دارای آب، ویژگی‌های زیست‌شناختی و گونه‌های جانوری و گیاهی غار، وضعیت ژئوتوریستی، غارسنگ‌ها و اشکال انحلالی موجود، جنبه‌های باستان‌شناختی، فسیل‌های موجود و جنبه‌های ایمنی و حفاظت غارها (جعفری و ارجمندزاده، ۱۴۰۰: ۵۳۵)، همچنین در ساخت سدها؛ بناها، ساختمانها، مترو، تونلها، خطوط راه آهن و تعیین چینه‌شناسی، دیرینه‌شناسی، کشف بقایای جانوری و آثار انسانهای اولیه دارای اهمیت بوده و از نظر زیست‌شناسی و مطالعه گونه‌های گیاهی و جانوران غارزی در گذشته و حال، وجود غار نهشته‌های زیبا و فراوان در جذب توریست نقش بسیار مهمی دارد (خضری و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۲).

محیط‌های کارستی از جمله محیط‌های بسیار آسیب‌پذیر در برابر تغییرات هستند. مدیریت ضعیف در زمینه آلودگی و عدم توجه به ویژگی‌های کارست، چه در سطح و چه در زیرزمین، منجر به آسیب‌های مکرر و شدید به محیط زیست و اکوسیستم‌های کارستی می‌شود (پاریس<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶: ۱۲). آلاینده‌های طبیعی (مواد آلی محلول) و انسانی (مثلاً نیتروژن حاصل از سپتیک‌تانک‌ها و کودهای کشاورزی) می‌توانند به راحتی از طریق لایه‌های نازک خاک، فروچاله‌ها و شکستگی‌های باز وارد سفره‌های زیرزمینی کارست شوند و به سرعت از طریق مجاری کارست در مسافت‌های طولانی انتقال می‌یابند (الشال<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۵۸). بسیاری از مناطق و شهرها به منابع آب کارست وابسته هستند (صقاری و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۶). نیاز مبرم به مدیریت یکپارچه، موثر و کارآمد منابع آب در سراسر جهان به رسمیت شناخته است (میزان‌الرحمان و همکاران، ۲۰۰۴: ۵۶۵). 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 (مددی و همتی، ۱۳۹۴: ۹۰).

شناخت، بررسی و ویژگی‌های محیط‌های کارستی که از سنگ‌های انحلال‌پذیر و عمدتاً از سنگ‌های بی‌کربناته نظیر سنگ‌های آهکی، تشکیل یافته و از دیدگاه کاربردی به بسیاری از فعالیتهای انسانی به ویژه تامین منابع آب جهت استفاده شرب، کشاورزی، صنعت و ... ارتباط پیدا می‌کند بسیار حایز اهمیت است. لزوم برنامه ریزی در پهنه‌های کارستی ایجاب می‌کند تا مطالعاتی در زمینه شناخت محیط‌های کارستی، ویژگیها و نقش آنها در تغذیه منابع آب زیرزمینی و سایر منابع صورت گیرد. بر اساس آخرین بررسی‌هایی که برای شناسایی پهنه‌های کارستی حوضه‌های رسوبی کپه داغ انجام شده، کل مساحت سازندهای کربناته این منطقه حدود ۱۲۰۰۰ کیلومتر مربع برآورد شده است (به‌نیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۵: ۳۳). شناسایی زمین‌شکل‌های کارستی به منظور مدیریت بهره‌برداری در قلمروهای کارستی ضرورت داشته و لازم است حفاظت و مدیریت زمین در قلمروهای کارستی مورد توجه خاص برنامه ریزان قرار گیرد. با توجه به اهمیت موضوع، در این زمینه تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که به ترتیب به آنها اشاره می‌شود:

هارتمن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای به بررسی روش‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی<sup>۴</sup> کارستی، تکامل آن و فرآیندهای هیدرولوژیکی خاص می‌پردازند. آنها مدل‌های مفهومی مختلف سیستم‌های کارستی و محدودیت‌های این مدل‌ها را مورد بررسی قرار دادند. اوکونومیدس و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های

1. Parise

2. Elshall

3. Hartmann

4. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches

5. Oikonomidis et al.

سنجش از دور و (GIS) به بررسی پتانسیل آب زیرزمینی در مناطق آهکی و آبرفتی پرداخته و مناطق دارای غلظت بالای نترات را شناسایی کردند. کوویروز و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۶) با استفاده از داده های سنجش از دور و مدل منطقی فازی مناطق با پتانسیل نفوذ بالا را در منطقه پامپا آرژانتین شناسایی کردند. الوارز و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۷) جهت ارزیابی ریسک زمین شناسی برای حفاظت از غارهای کارست اسپانیا (غارهای الکردی، ناوار) به ارائه روشی برای محاسبه پتانسیل خسارت وارد شده به منافع فرهنگی واقع در یک محیط کارستی پرداختند. در این مطالعه نقشه برداری زمین شناسی، ژئومورفولوژی اندوکارست و اگزوکارست و بررسی شکستگی توده سنگ آهک صورت گرفته است. در پژوهشی ابوسادا<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) با استفاده از نوسانات سطح آب در یک سفره زیرزمینی در یک بازه زمانی خاص یک روش جایگزین برای تخمین تغذیه سالانه آب زیرزمینی براساس تعادل آب ورودی و خروجی ارائه داد. کاهالان و میلوسکی<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) در پژوهشی به مکانیسم های تشکیل سینک هول و تجزیه و تحلیل پیش بینی مبتنی بر زمین آمار در زمین کارستی پرداخته اند. نتایج آنها حاکی از عوامل کنترل کننده موثر بر شکل گیری سینک هول و نشان دادن پتانسیل برای برنامه های مشابه در دیگر مناطق کارست با یک سری زمانی از DEM و مجموعه داده های فرعی مشابه می باشد. رویکرد مبتنی بر (GIS) جایگزین روش هایی که به بررسی های میدانی جامع برای تشخیص سینک هول و فاکتورهای کنترل کننده می باشد نیست، ولی برای درک توسعه فروچاله ها در مناطق بزرگ جهت انتخاب استراتژی های مناسب برای کاهش خطرات لازم می باشد. روجیری و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۲) در پروژه ای به بررسی های مورفولوژی، داده های ساختاری، نهشته ها و برخی عناصر فیزیکوشیمیایی کارست های برخی از مناطق جمهوری ارمنستان پرداختند.

در زمینه مطالعات مربوط به منابع آب کارست با توجه به نقش مهم پهنه های کارستی در تغذیه آبخوان های کارستی، شناخت عوامل مؤثر در تحول و پهنه بندی کارست دارای جایگاه ویژه ای هستند این مطالعات می تواند جهت مدیریت کیفی، کمی و حفاظت از این منابع در مقابل آلودگی های ناشی از فعالیت های انسانی مورد استفاده قرار گیرند (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۴). مددی و همی (۱۳۹۴) با استفاده از مدل منطق فازی به پهنه بندی قابلیت کارست زایی در منطقه نمک آبرود پرداختند. نتایج تحقیق آنها قابلیت بالای منطقه را در کارست زایی نشان می دهد همچنین مزیدی و همکاران (۱۳۹۵) با پتانسیل یابی توسعه کارست در دشت سوسن و ایذه با استفاده از منطق فازی نشان دادند که میزان کارستی شدن با کاهش میزان شیب و فاصله از گسل، افزایش رسوبات آهکی، میزان دما، پوشش گیاهی، میزان بارندگی و پوشش سطح خاک ارتباط دارد. مکرم و نگهبان (۱۳۹۷) مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن را در بخش هایی از غرب استان فارس با استفاده از روش های فازی و AHP مشخص نمودند. دسترنج و همکاران (۱۳۹۸) به پهنه بندی توسعه کارست سطحی در توده آهکی بیستون با استفاده از مدل منطق فازی پرداختند. صفاری و همکاران (۱۳۹۸) عوامل توسعه یافتگی کارست را در کوهستان خورین با اعمال مدل فازی و تلفیق عوامل مختلف سنگ شناسی، فاصله از گسل، بارش، دما، شیب، ارتفاع، جهت شیب و پوشش گیاهی مورد بررسی قرار دادند و جهت صحت سنجی نقشه پهنه بندی توسعه کارست از لایه فروچاله های استخراج شده استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که ۹۸ درصد فروچاله ها به ترتیب در طبقه کارست با توسعه زیاد، طبقه کارست با توسعه متوسط و طبقه کارست با توسعه کم قرار می گیرند که به طور دقیق با ارتفاعات منطقه و وضعیت سنگ شناسی مطابقت دارد. رضایی و همکاران (۱۳۹۹) با پهنه بندی تحول کارست در حوضه کوهستانی کلات نشان داد که عامل لیتولوژی مهمترین عامل کنترل کننده پتانسیل توسعه کارست در منطقه مورد مطالعه بوده است. همچنین پارامترهای لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، توپوگرافی (عامل شیب) و فاصله از آبراهه

1. Quiroz et al.

2. Lvarez et al.

3. Abusaada

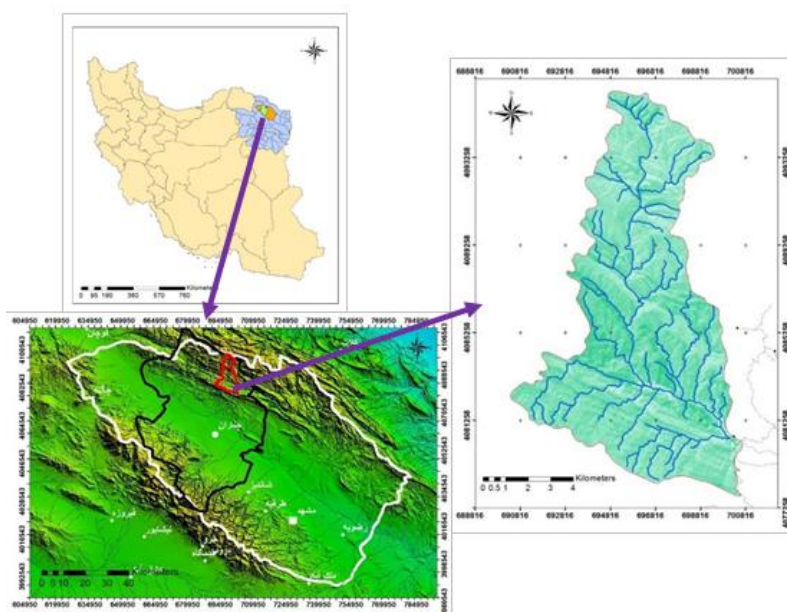
4. Cahalan & Milewski

5. Ruggieri et al.

مهمترین نقش را در توسعه کنونی کارست دارند. صفاری و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از ۸ فاکتور لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، اقلیم، ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی در توده کارستیک خورین مناطق مستعد توسعه کارست را شناسایی و با استفاده از مدل Paprika مناطق آسیب‌پذیر را مشخص کردند. نتایج تحقیق حجازی و حیدری (۱۴۰۱) در حوضه روانسر نشان داد که مناطق شمالی و غربی حوضه در کلاس توسعه یافتگی زیاد و نسبتاً زیاد قرار دارد و حدود ۸/۳ کیلومترمربع از مناطق کارستیک توسعه یافته را نواحی انسان ساخت و مستعد آلودگی اشغال کرده است. شناخت عوامل موثر در پهنه بندی و توسعه کارست در زمینه مطالعات مربوط به منابع آب کارست از جنبه هیدرولوژیکی، هیدرو شیمیایی و آسیب پذیری دارای جایگاه ویژه ای می باشد. شناخت هرچه بیشتر سیستمهای کارستی بویژه پدیده های ژئومورفولوژیک آن نقش حیاتی و اساسی در بهره برداری بهینه و مدیریت پایدار منابع آب کارست دارد. عوامل مؤثر بر پتانسیل آب کارست، نشان از فاکتورهایی است که احتمال وجود آب را در یک منطقه کارستی نسبت به سایر مناطق بیشتر می داند. پهنه بندی توسعه کارست سطحی در زمینه مطالعات مدیریت کارست، کاربرد زیادی دارد. پژوهش های انجام شده بیانگر تأثیر پارامترهای زمین شناسی، اقلیم و ژئومورفولوژیکی در توسعه مناطق کارستیک می باشد. در ارتباط با تحقیقات پیشین لازم به ذکر است که تاکنون در زمینه پهنه بندی توسعه کارست، مطالعاتی در منطقه صورت نگرفته است.

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز بقمچ در دامنه جنوبی رشته کوههای هزار مسجد، در بخش شمال غربی دشت مشهد قرار دارد. این حوضه در محدوده طول های جغرافیایی "۲۶' ۰۱۲" ۵۹° الی "۰۲' ۱۵" ۵۹° شرقی و عرض های جغرافیایی "۳۸' ۳۸" ۳۶° الی "۳۷' ۵۹" ۳۶° شمالی، در فاصله حدود ۳۰ کیلومتری شمال شهر چناران در حوضه آبخیز رودخانه کشف رود قرار دارد. زیرحوضه آبخیز بقمچ با ۹۶/۵ کیلومتر مربع مساحت، دارای اقلیم سرد و خشک و رژیم بارش زمستانه - بهاره می باشد.



شکل ۱: نقشه موقعیت و وضعیت زهکشی حوضه ی آبخیز بقمچ در شهرستان چناران و دشت مشهد.

به علت وجود تشکیلات آهکی در بخش غالب حوضه، رودخانه دارای آب دائم می باشد به طوری که حتی در سالهای خشک هم این رودخانه علاوه بر تأمین آب مورد نیاز شرب و باغات روستاهای داخل حوضه، از آب خروجی برخوردار

است. این منطقه به دلیل وجود گسلهای اصلی و فرعی یک منطقه ی تکتونیزه محسوب می شود. شکل شماره ۱ موقعیت حوضه آبخیز بقمچ را نشان می دهد.

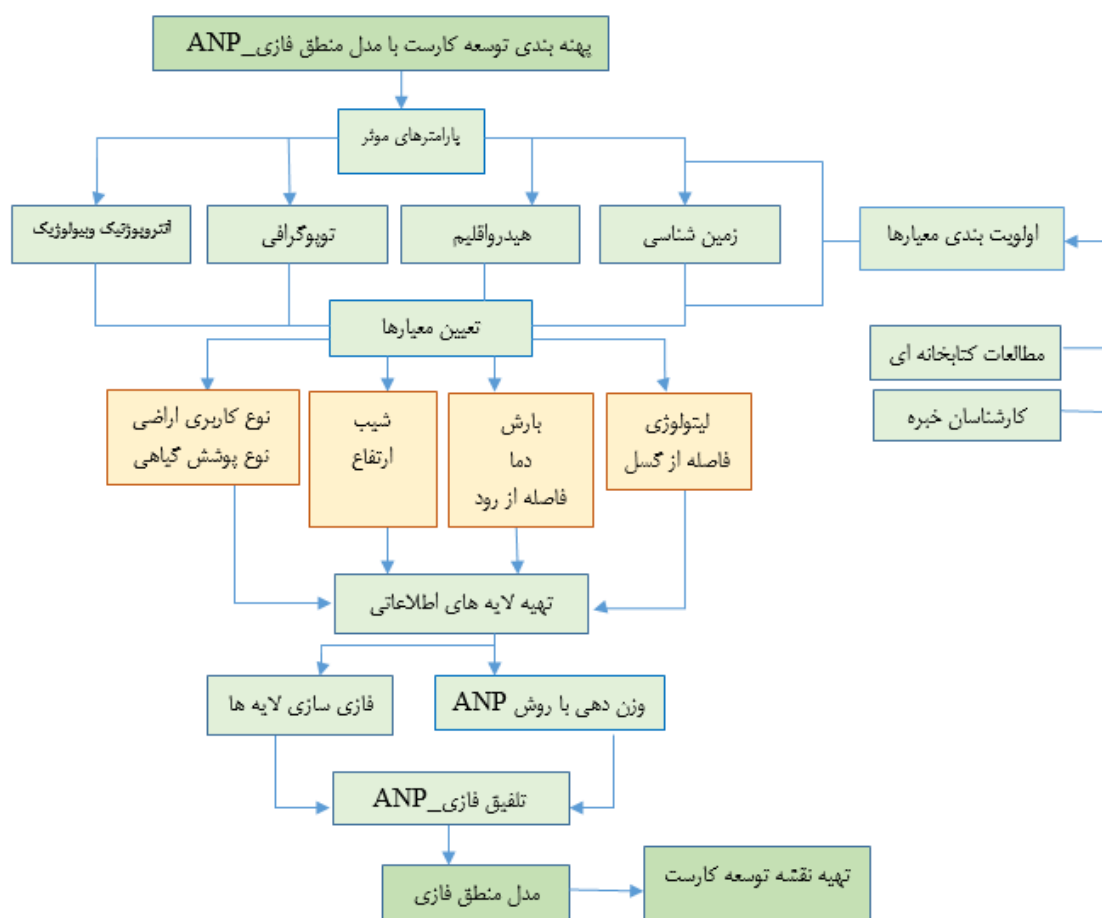
### مواد و روش ها

تحقیق حاضر با توجه به هدف از نوع کاربردی و در زمره تحقیقات توصیفی\_تحلیلی می باشد. در این پژوهش برای پهنه بندی توسعه کارست سطحی منطقه مورد مطالعه از تلفیق روش (ANP) و مدل فازی استفاده شده است. از مدل تحلیل شبکه برای وزن دهی به شاخص های مورد مطالعه در پژوهش و از مدل منطق فازی برای هم پوشانی و تجزیه و تحلیل داده ها استفاده شده است.

مواد پژوهش شامل منابع کتابخانه ای (مقالات، کتابها، اسناد تصویری نظیر نقشه ها و گزارش ها) و مطالعات میدانی (مشاهده، مصاحبه و پرسشنامه) می باشد و برای تجزیه و تحلیل داده ها از تکنیک فازی\_ (ANP) استفاده شده است. در ابتدا پارامترهای موثر در توسعه کارست شناسایی و اولویت بندی شد. سپس داده ها و اطلاعات آماری -توصیفی موثر در تحقیق انتخاب و جمع آوری گردید. در ادامه معیارها و پارامترهای موثر در طبقات مختلف براساس نوع اولویت قرار داده شد. داده ها در دو بخش (ANP) و فازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نهایتاً لایه های فازی شده با ارزشهای متناظر (ANP) آنها تلفیق می گردد. در مرحله آخر با اعمال همپوشانی فازی مناطق توسعه کارست مشخص گردید. شکل شماره (۲) مراحل اجرای تحقیق را نشان می دهد.

جهت تهیه ی لایه های اطلاعاتی از نرم افزار ARC GIS استفاده شده است. از نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح برای مشخص کردن خط الرأس ها و استخراج حوضه و نقشه های زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان چناران سازمان زمین شناسی کشور برای لیتولوژی و شناسایی گسلهای مورد مطالعه استفاده شده است. از لایه DEM با دقت مکانی ۳۰ متر در باند SWIR سنجنده ASTER، جهت استخراج لایه های ارتفاع و شیب استفاده شده است. موقعیت آبراهه ها نیز از لایه DEM منطقه استخراج شدند.

برای پهنه بندی مناطق توسعه کارست بر اساس مدل تلفیقی (ANP) و فازی باید ابتدا هر کدام از لایه ها را فازی کرد. برای فازی سازی، بایستی لایه ها به صورت فرمت رستری باشند. لایه های خطی با استفاده از تحلیل Distance و برای لایه های پلیگونی در جدول اطلاعات توصیفی شان فیلد ارزش ساخته و بر اساس مناسب بودنشان برای توسعه کارست طبق نظر کارشناسی کدگذاری شده و با دستور feature to raster به لایه های رستری تبدیل شدند. پس از آن هر کدام از لایه ها با استفاده از توابع در محیط ARC GIS با دستور Fuzzy membership فازی شدند و در طیف عددی صفر تا یک قرار گرفتند.



شکل ۲: روند جریان پژوهش

### استانداردسازی لایه های اطلاعاتی

بر اساس تئوری فازی و اصل ترکیبی رابطه فازی، مرزهای فازی را می توان به سادگی کمی سازی کرد. ارزیابی جامع فازی برای تعیین کمیت شاخص های ارزیابی کیفی و تقریب مقادیر دقیق شاخص های کمی استفاده می شود (جان بینگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۲۴۲). در منطق فازی هر منطقه با توجه به مقداری که معیار مورد نظر ( $X$ ) را رعایت می کند مقدار عضویتی میگیرد ( $\mu_X$ ) که بیان کننده ی میزان مطلوبیت آن ناحیه می باشد. به این معنی که هر ناحیه با مقدار عضویت بالاتر، از مطلوبیت بالاتری برخوردار است (حاجی زاده وادقانی، ۱۳۹۷: ۲۲۴). در حقیقت گذار از یک طبقه به طبقه دیگر تدریجی و آهسته است. عناصر هر طبقه نیز با یک درجه عضویت معین به هر طبقه تعلق دارند. لطفی زاده درجه عضویت عناصر یک مجموعه را در عالم واقعی، نامعین و مقدار آن را از صفر تا یک تعیین کرد. تئوری فازی قدرت انعطاف پذیری بالایی را داراست، برای اینکه در مقایسه با روشهای باینری (دارای دو ارزش صفر و یک) منطق فازی اجازه می دهد که یک پیکسل بر اساس درجه عضویت غیر صفر به چندین کلاس تعلق داشته باشد (هاشم زاده و ولیزاده کامران، ۱۴۰۱: ۴).

<sup>۱</sup>. Jun-ying

استاندارسازی لایه های اطلاعاتی بر حسب نظر کارشناسان و منابع کتابخانه ای صورت گرفته است. برای استانداردسازی لایه ها، از روش منطق فازی استفاده شده است به این صورت که لایه های اطلاعاتی بر حسب ارزشی که جهت اهداف مورد نظر دارند بین صفر و یک ارزشگذاری شده اند.

### عملگر گاما

منطق فازی دارای اپراتورهای؛ اشتراک فازی<sup>۱</sup>، اجتماع فازی<sup>۲</sup>، ضرب فازی<sup>۳</sup>، جمع فازی<sup>۴</sup> و گاما<sup>۵</sup> که هر یک دارای نحوه عمل خاصی هستند، در محیط نرم افزار ARC GIS قابل اجراست. عملگر اجتماع فازی، حداکثر درجه عضویت اعضا را استخراج می کند و از دقت بالایی در پهنه بندی برخوردار نمی باشد. در عملگر جمع جبری فازی ارزش پیکسل ها به سمت یک میل می کند و در نتیجه تعداد پیکسل بیشتری در کلاس خوب قرار می گیرند. به همین دلیل این اپراتور حساسیت کمی در پهنه بندی دارد. برای تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر فازی ضرب و حساسیت خیلی کم فازی جمع اپراتور گاما معرفی شده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۳۱-۱۳۰). که حد فاصل این دو عملگر می باشد. اگر  $\gamma$  برابر ۱ باشد خروجی نقشه همان fuzzy sum خواهد بود و اگر  $\gamma$  برابر صفر باشد نقشه ی خروجی همان نقشه fuzzy product خواهد بود؛

#### معادله ۱

$$\mu = ((\text{Fuzzy Algebraic Sum})^\gamma + (\text{Fuzzy Algebraic Product}))^{1-\gamma}$$

که در آن  $\mu$  لایه حاصل از گامای فازی و  $\gamma$  پارامتر تعیین شده در محدوده صفر و یک است (حاجی زاده وادقانی، ۱۳۹۷: ۲۲۶).

نقشه های فاصله از گسل، همباران، همدم، فاصله از رود، شیب و ارتفاع به دلیل کمی بودن، با استفاده از منطق فازی بین محدوده صفر و یک وزندهی شدند. برای فازی سازی نقشه های لیتولوژی، تراکم پوشش گیاهی و کاربری اراضی به دلیل اینکه دارای پارامترهای کیفی هستند، به مناطقی که از لحاظ توسعه کارست مناسب نیستند، ارزش عددی صفر و به سایر کاربریها که از لحاظ توسعه کارست مناسب هستند، ارزش عددی یک داده شده است (شکل شماره ۳). جهت پهنه بندی مناطق مساعد توسعه کارست از گامای ۰,۹ استفاده شده است.

<sup>۱</sup> Fuzzy AND

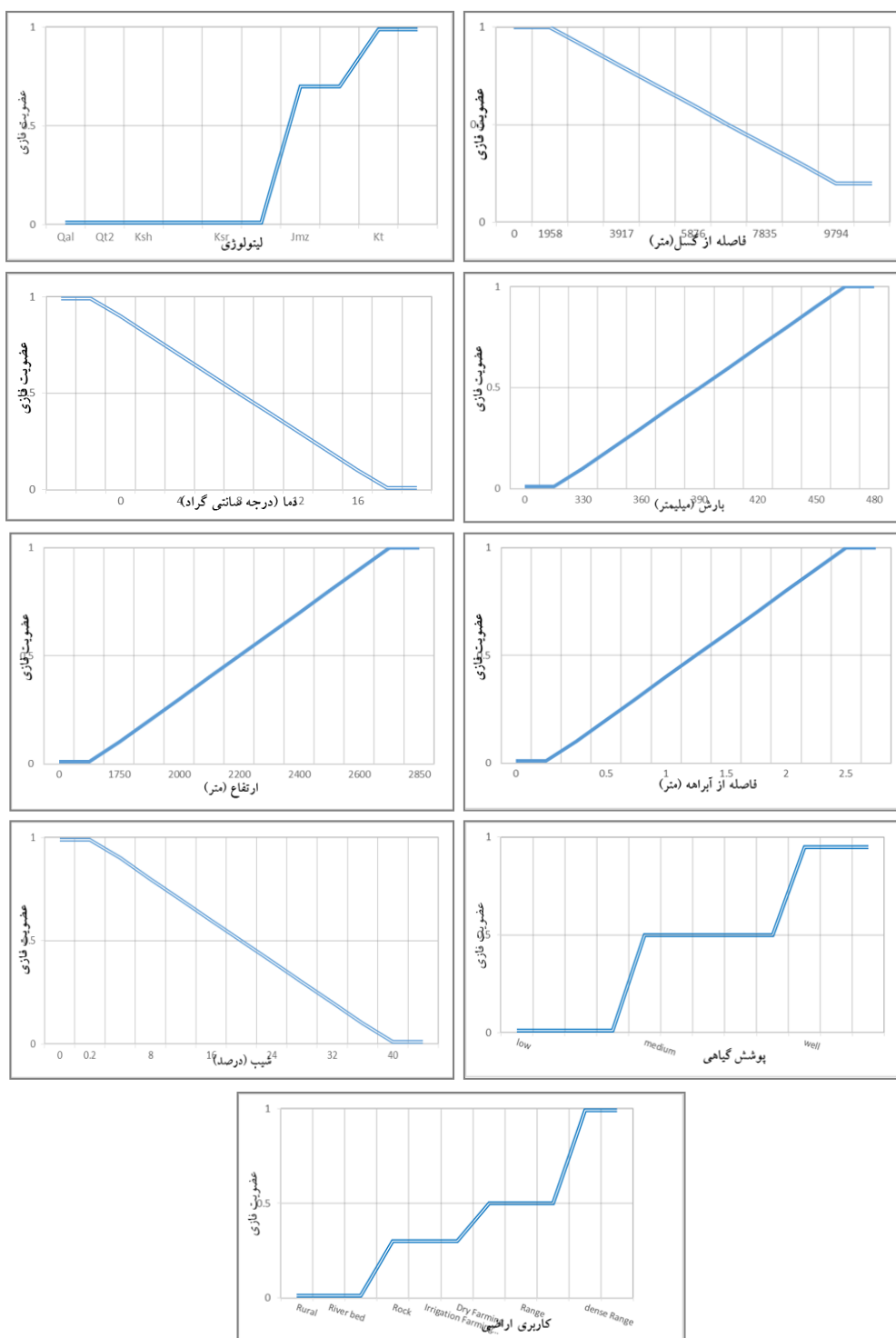
<sup>۲</sup> Fuzzy OR

<sup>۳</sup> Fuzzy Product

<sup>۴</sup> Fuzzy SUM

<sup>۵</sup> Fuzzy Gamma





شکل ۳: تابع عضویت فازی لایه های اطلاعاتی

### فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP)<sup>۱</sup>

فرآیند تحلیل شبکه ای یکی از روش های تصمیم گیری چند معیاره با ساختار غیر خطی و روابط دو سویه است (قربان نیا خیبری، ۱۳۹۸: ۲۹). روش تحلیل شبکه ای به وسیله ساعتی<sup>۲</sup> و تاکی زاوا در سال ۱۹۸۶ پیشنهاد شد و تصمیم روش AHP است. فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP) هر موضوع و مسئله ای را به مثابه شبکه ای از معیارها، زیرمعیارها و گزینه ها که با یکدیگر در خوشه هایی جمع شده اند، در نظر میگیرد. تمامی عناصر در یک شبکه میتوانند به هر شکل، دارای ارتباط با یکدیگر باشند. به عبارت دیگر، در یک شبکه، بازخورد و ارتباط متقابل بین و میان خوشه ها امکانپذیر است (زاهدی، ۱۳۹۵: ۱۹۰) در روش (ANP) علاوه بر اهمیت معیار، اهمیت گزینه ها نیز در نظر گرفته میشود و سیستم تصمیم گیری خطی با یک سیستم پیچیده تر جایگزین می گردد (قربانی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۶۲) لازمه ی استفاده از این روش، شناخت کافی از هدف تصمیم گیری، محیط تصمیم و تمامی عناصر تصمیم گیری به وسیله ی تصمیم گیرنده است (فرزین کیا و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۵) این شناخت به این علت لازم است که تصمیم گیرنده بتواند همه ی ملاک های مؤثر در تصمیم را تعیین و تأثیر آن ها بر یکدیگر را مشخص و بتواند واقعی ترین حالتی از شبکه را رسم کند. مقایسه های زوجی اولویت واقعی عناصر نسبت به یکدیگر را نشان دهند. راه حل طبیعی برای انجام مقایسه ها در حالت های نبود قطعیت استفاده از مقایسه های فازی است که حالت های ابهام در مقایسه را مدل سازی کند (خدمت زاده و حسنی، ۱۳۹۹: ۷۳). فرآیند روش تصمیم گیری تحلیل شبکه ای (ANP) را به عنوان یک ابزار تصمیم گیری چند معیاره به وسیله جایگزینی شبکه به جای سلسله مراتب بهبود می بخشد. یک مسئله پیچیده را می توان به چند مسئله فرعی متشکل از سطوح سلسله مراتبی به گونه ای تجزیه کرد که هر سطح در برگیرنده مجموعه ای از معیارها و گزینه های مربوط به هر مسئله فرعی باشد. مراحل رویکرد گام به گام شامل؛ مرحله اول: مقایسه زوجی معیارها با توجه به هدف مساله، مرحله دوم: مقایسه زوجی بین معیارها با توجه به هر معیار، مرحله سوم: مقایسه زوجی بین گزینه ها با توجه به معیارها، مرحله چهارم: مقایسه زوجی بین گزینه ها نسبت به گزینه ها و مرحله پنجم: تعیین ارجحیت گزینه ها می باشد (داس و چاکرابورتی<sup>۳</sup>؛ ۲۰۱۱: ۵۳-۵۰).

ابتدا معیارها و شاخص های تأثیرگذار بر هدف مشخص می گردد. یکی از روشهای تعیین معیارها مصاحبه با کارشناسان، اساتید و مسئولین مرتبط با موضوع می باشد. پس از تعیین معیارها، معیارها بر حسب مشابهت موضوعی دسته بندی شده و تشکیل خوشه هایی را می دهند. در این پژوهش به منظور انجام آنالیزهای مربوط به روش (ANP) از نرم افزار Super decision استفاده شده است. براساس نظر کارشناسان چهار خوشه زمین شناسی، هیدرواقليم، توپوگرافی و آنتروپوژنیک و بیولوژیک در نظر گرفته شده است که هر یک از خوشه ها دارای چند معیار هستند. اولویت بندیها مطابق نظر کارشناسان در دو سطح درون لایه ای<sup>۴</sup> و معیارها (بین خوشه ای یا لایه ای) انجام گرفته است. وزن نهایی هر یک از پارامترها از حاصلضرب در وزن خوشه آن بدست می آید. ارزشهای هر پارامتر اراضی مطابق مدل (ANP) به شرح جدول ۲ استخراج شد. گامهای انجام فرآیند تحلیل شبکه در این پژوهش به شرح جدول زیر است:

1. Analytical Network Process

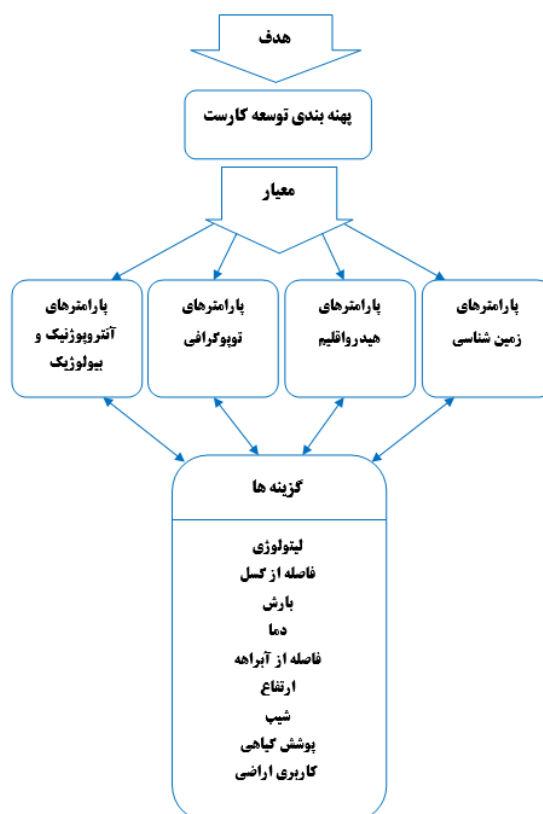
2. Thomas L. Saaty

3. Das & Chakraborty

4. Alternative

جدول ۱: گام‌های انجام فرایند تحلیل شبکه در پژوهش

براساس هدف تصمیم‌گیری، شاخص‌های تصمیم‌گیری و گزینه‌های ممکن مشخص (شکل ۴) شد.	<b>گام اول:</b> <b>ایجاد مدل و تعیین هدف</b>
مقایسه زوجی برای دست آوردن اهمیت نسبی معیارهای زمین‌شناسی، هیدرواقلیم، توپوگرافی، آنتروپوژنیک و بیولوژیک انجام شد. بدین منظور یک معیار نسبی از یک تا نه برای مقایسه دوعامل به کار می‌رود.	<b>گام دوم:</b> <b>مقایسه زوجی</b>
وزن‌های داخلی شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها که در مرحله اول مشخص شده بودند، محاسبه می‌گردد. همچنین مانند مرحله قبل، ماتریس‌های مقایسه زوجی انجام گردید با این تفاوت که در این مرحله وابستگی‌های درونی و بازخوردی مدنظر می‌باشد.	<b>گام سوم:</b> <b>انجام مقایسه‌های زوجی برای وابستگی درونی و بازخوردی</b>
سوپر ماتریس یک ماتریس مرکب است که هر ماتریس فرعی آن شامل مجموعه‌ای از روابط بین و درون سطوحی است. سوپر ماتریس‌ها برای تجزیه، تحلیل وابستگی‌های داخلی میان اجزای سیستم، بکار می‌رود.	<b>گام چهارم:</b> <b>تشکیل سوپر ماتریس</b>
از سوپر ماتریس برای همگرایی و رسیدن به یک مجموعه از وزن‌های ثابت استفاده می‌شود. به توان رساندن سوپر ماتریس باعث همگرایی می‌شود.	<b>گام پنجم:</b> <b>سوپر ماتریس حد</b>
وزن کلی هر کدام از گزینه‌ها با ضرب وزن‌های به دست آمده از هر کدام از مراحل پیشین مشخص و با توجه به آن تصمیم‌نهایی اتخاذ می‌شود. در این مرحله وزن‌نهایی معیارها و نه پارامتر لیتولوژی، فاصله از گسل، بارش، دما، فاصله از آبراهه، ارتفاع، شیب، پوشش گیاهی و کاربری اراضی مشخص می‌گردد.	<b>گام آخر:</b> <b>انتخاب بهترین تصمیم</b>



شکل ۴: مدل تصمیم‌گیری در فرآیند تحلیل شبکه ای

## یافته های تحقیق

وزن نه معیار؛ لیتولوژی، فاصله از گسل، شیب به درصد، ارتفاع، فاصله از رودخانه، بارش به میلی متر (همباران) ، دما (همدما)، تراکم پوشش گیاهی، نوع کاربری اراضی و زیر معیارهای آن ها با استفاده از مدل Fuzzy \_ANP در نرم افزار Super Decisions به دست آمد که به ترتیب زیر در جدول شماره ۲ و ۳ ارائه گردیده است. مقایسه پارامترها نشان می دهد که عامل لیتولوژی و بارش به ترتیب با وزن ۰,۲۳۳ و ۰,۲۰۱۱ بیشترین وزن و عامل فاصله از آبراهه و نوع کاربری اراضی به ترتیب با وزن ۰,۱۸۷ و ۰,۲۰۴ کم ترین وزن را به خود اختصاص داده اند.

جدول ۲: وزن نهایی زیرمعیارها

معیار	زیرمعیار	وزن	کلاس بندی در نقشه	معیار	زیرمعیار	وزن	کلاس بندی در نقشه	
فاصله از گسل (متر)	فاصله ۱۸۰۰ متری از گسل	۰,۱	۱	مجموع بارش سالانه (میلیمتر)	۴۸۰-۴۵۰ میلیمتر	۰,۰۱	۱	
	فاصله ۳۶۰۰ متری از گسل	۰,۰۴	۲		۴۵۰-۴۲۰ میلیمتر	۰,۰۷	۲	
	فاصله ۴۴۰۰ متری از گسل	۰,۰۰۹	۳		۴۲۰-۳۹۰ میلیمتر	۰,۰۳	۳	
	فاصله ۵۲۰۰ متری از گسل	۰,۰۰۰۷	۴		۳۹۰-۳۶۰ میلیمتر	۰,۰۰۰۹	۴	
	فاصله ۷۰۰ متری از گسل	۰,۰۰۰۱	۵		۳۶۰-۳۳۰ میلیمتر	۰,۰۰۰۲	۵	
	جمع	۰/۱۴۹۸		جمع	۰/۲۰۱۱			
لیتولوژی	سازند مزدوران	۰,۱۲۱	۱	متوسط دمای سالانه (درجه سانتی گراد)	کمتر از ۰ درجه سانتی گراد	۰,۱	۱	
	سازند تیرگان	۰,۱۱۱	۲		۰-۴ درجه سانتی گراد	۰,۰۲	۲	
	سازندها غیر کارستی	۰,۰۰۱	۳		۴-۸ درجه سانتی گراد	۰,۰۰۲	۳	
	جمع	۰/۲۳۳			۸-۱۲ درجه سانتی گراد	۰,۰۰۰۴	۴	
طبقات ارتفاعی (متر)	۲۶۰۰-۲۸۵۰ متر	۰,۱	۱	فاصله از آبراهه (متر)	۱۲-۱۶ درجه سانتی گراد	۰,۰۰۰۱	۵	
	۲۴۰۰-۲۶۰۰ متر	۰,۰۰۶	۲		جمع	۰/۱۲۲۵		
	۲۲۰۰-۲۴۰۰ متر	۰,۰۰۴	۳		فاصله ۲,۵ متری از آبراهه	۰,۰۱	۱	
	۲۰۰۰-۲۲۰۰ متر	۰,۰۰۰۲	۴		فاصله ۲ متری از آبراهه	۰,۰۰۵	۲	
	۱۷۵۰-۲۰۰۰ متر	۰,۰۰۰۱	۵		فاصله ۱,۵ متری از آبراهه	۰,۰۰۳	۳	
	جمع	۰/۱۱۰۳		فاصله ۱ متری از آبراهه	۰,۰۰۰۶	۴		
شیب (درصد)	۱۲-۰	۰,۱	۱	کاربری اراضی	فاصله ۰,۵ متری از آبراهه	۰,۰۰۰۱	۵	
	۲۰-۱۲	۰,۰۰۲	۲		جمع	۰/۰۱۸۷		
	۲۸-۲۰	۰,۰۰۱	۳		مرتع مشجر	۰,۰۱۵	۱	
	۳۲-۲۸	۰,۰۰۰۶	۴		مرتع	۰,۰۰۵	۲	
	۴۰-۳۲	۰,۰۰۰۴	۵		اراضی سنگی، اراضی زراعی و باغی	۰,۰۰۰۳	۳	
جمع	۰/۱۰۴							
متراکم	۰,۰۳	۱						
تراکم پوشش گیاهی	متوسط	۰,۰۱	۲	بستر رودخانه، آبادی	جمع	۰/۰۲۰۴		
	فقیر	۰,۰۰۰۲	۳					
	جمع	۰/۰۴۰۲						

جدول ۳: وزن نهایی خوشه‌ها و معیارها

بیولوژیک و آنتروپوژنیک		توپوگرافیک		هیدرواقليم			زمین شناسی		خوشه
۰,۰۹۷۸		۰,۱۱۳۲		۰,۳۳۰۳			۰,۴۵۸۷		وزن خوشه
نوع کاربری اراضی	نوع پوشش گیاهی	شیب	ارتفاع	فاصله از رود	دما	بارش	فاصله از گسل	لیتولوژی	معیار
۰,۰۱۰۲۱	۰,۰۲۰۱۱	۰,۰۵۲۱۱	۰,۰۵۵۱۳	۰,۰۰۹۳۵	۰,۰۶۱۲۴	۰,۱۰۰۵۴	۰,۰۷۴۹۱	۰,۱۱۶۵۱	وزن اولیه
۰,۲۰۷۵۲۸	۰,۴۰۸۹۵۲	۰,۹۲۰۴۹۵	۰,۹۷۴۳۸۲	۰,۰۵۶۶۱۵	۰,۳۷۰۸۷۵	۰,۶۰۸۸۴	۰,۳۲۷۰۷۴	۰,۵۰۸۹۵۲	وزن نرمال نشده
۰,۰۲۰۴	۰,۰۴۰۲	۰,۱۰۴۲	۰,۱۱۰۳	۰,۰۱۸۷	۰,۱۲۲۵	۰,۲۰۱۱	۰,۱۴۹۸	۰,۲۳۳۱	وزن نهایی نرمال شده

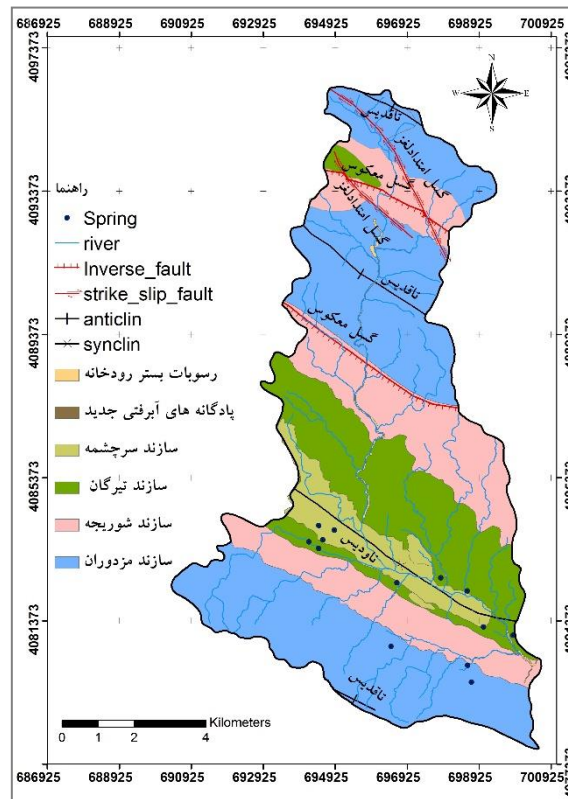
## معیارهای موثر در توسعه کارست

## پارامترهای زمین شناسی (لیتولوژی و فاصله از گسل)

مطالعات زمین شناسی در مناطق کارستی، باتوجه به نقش زیاد نوع لیتولوژی در توسعه کارست اهمیت زیادی دارد. وجود سنگهای انحلال پذیر که دارای ضخامت مناسبی باشند، یکی از پیش شرط های توسعه سرزمین های کارستی می باشد. وجود یک لایه با نفوذناپذیری کم نیز در زیر لایه نفوذپذیر باعث می شود که انحلال به یک لیتولوژی خاص معطوف شده و تشکیلات کارستی توسعه یابند (رضایی عارفی، ۱۳۹۹: ۸۴). حوضه کوهستانی بقمچ در دامنه های جنوبی زون هزار مسجد\_کپه داغ واقع گردیده است. سازندهای آهکی عمده حوضه مورد مطالعه شامل سازندهای مزدوران و تیرگان می باشد. در حوضه مورد مطالعه مجموعاً ۵ واحد سنگ چینه ای مشخص شده است. در این راستا سازندها به دو دسته کارستی و غیر کارستی دسته بندی شدند (شکل ۵). با استفاده از توابع بردار به رستر، نقشه رستری لیتولوژی منطقه تهیه گردید (شکل ۷).

جدول ۴: توزیع سازندهای کربناته و غیر کربناته در حوضه کوهستانی بقمچ

در صد گسترش	مساحت (کیلومتر مربع)	نوع سازند		علامت اختصاری	نام سازند
۴۴/۴۲	۴۲/۹	دولومیتی_ آهکی	کارستی	J <sup>k</sup> mz	سازند مزدوران
۲۰,۹۳	۲۰,۲			K t	سازند تیرگان
۶,۴۴	۲۶,۱	غیر کربناته_ ماسه سنگ	غیر کارستی	Ksh	سازند شوربچه
۲۷,۰۳	۶,۲	غیر کربناته_ شیل		Ksr	سازند سرچشمه
۰,۳۷	۰,۳۶	غیر کربناته_ آواری یا		Qt2	رسوبات آبرفتی
۰,۰۱	۰,۷۴	تخریبی		Qal	کواترنر
۱۰۰	۹۶,۵۰۳	مجموع			

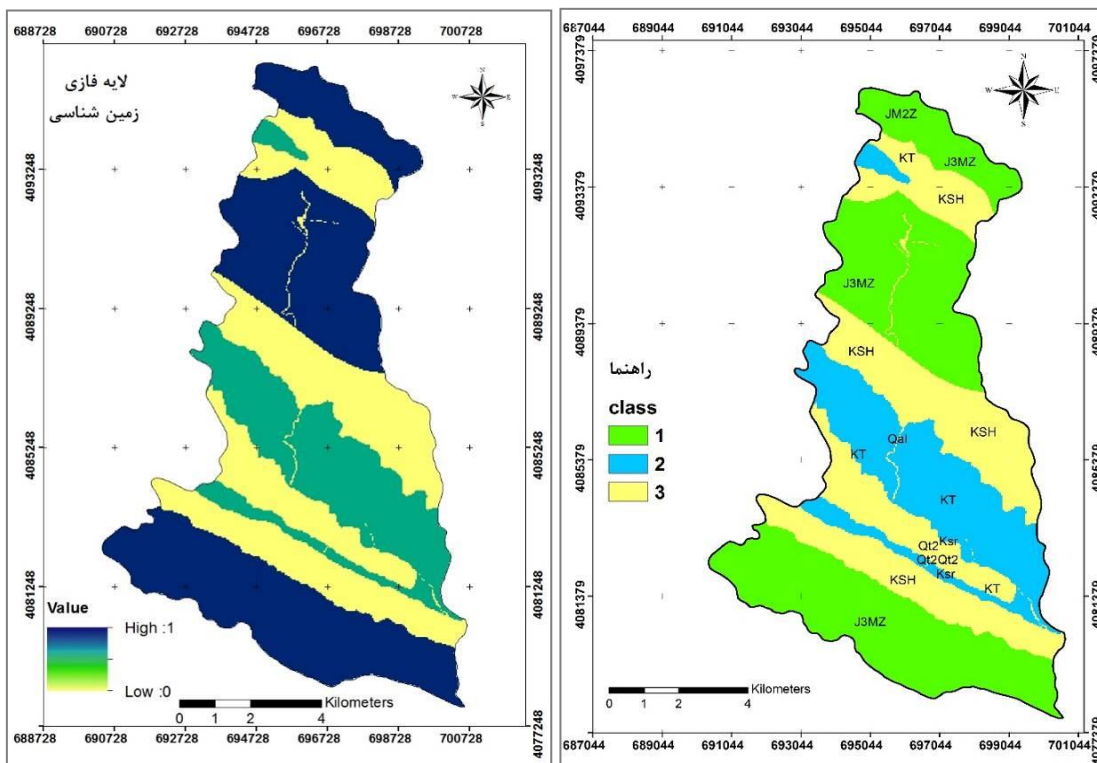


شکل ۵: نقشه زمین شناسی حوضه آبخیز بقمچ

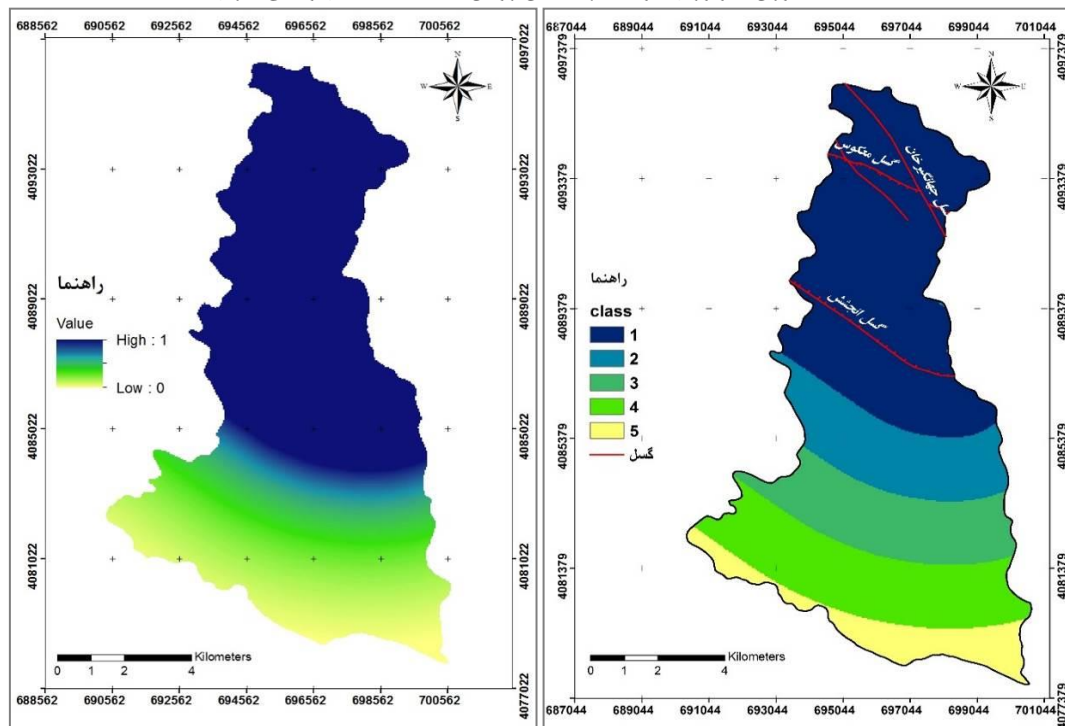
منطقه مورد مطالعه در یکی از نواحی به نسبت فعال تکتونیکی شمال شرق کشور واقع شده که به تبع آن گسلهایی با امتداد تقریبی شمال غربی-جنوب شرقی به وجود آمده اند. گسلها بیشتر از نوع امتداد لغز و یا از نوع معکوس هستند و در نقاطی گسلهای راندگی نیز دیده می شود. گسلهای امتداد لغز بیشتر دارای راستای شمالی-جنوبی هستند که نشان از اعمال نیرویی در همین راستا دارد که به گسل جهانگیر می توان اشاره نمود. گسلهای راندگی و معکوس دارای راستایی حدودا شمال غربی-جنوب شرقی که نشان دهنده وجود نیرویی در جهت عمود بر راستای این گسلها، یعنی شمال شرقی-جنوب غربی می باشد که به گسل انجیش می توان اشاره کرد (شکل ۵). گسلها در گسترش و تکامل کارست نقش اساسی دارند. به علت وجود شکاف ها در جوار عوامل انحلال دهنده امکان نفوذ آب در این سنگ ها امکان پذیر می گردد (خوشرفتار و همکاران، ۱۳۹۸: ۲). (شکل ۶) میزان نفوذپذیری سنگها در مناطق نزدیک گسل به علت تکتونیزه بودن و وجود درزه و شکاف، بیشتر است (شکل ۸).



شکل ۶: توسعه سیستم درز و شکاف (الف) ساخت های چین خورده با فشارهای تکتونیکی شدید (ب)



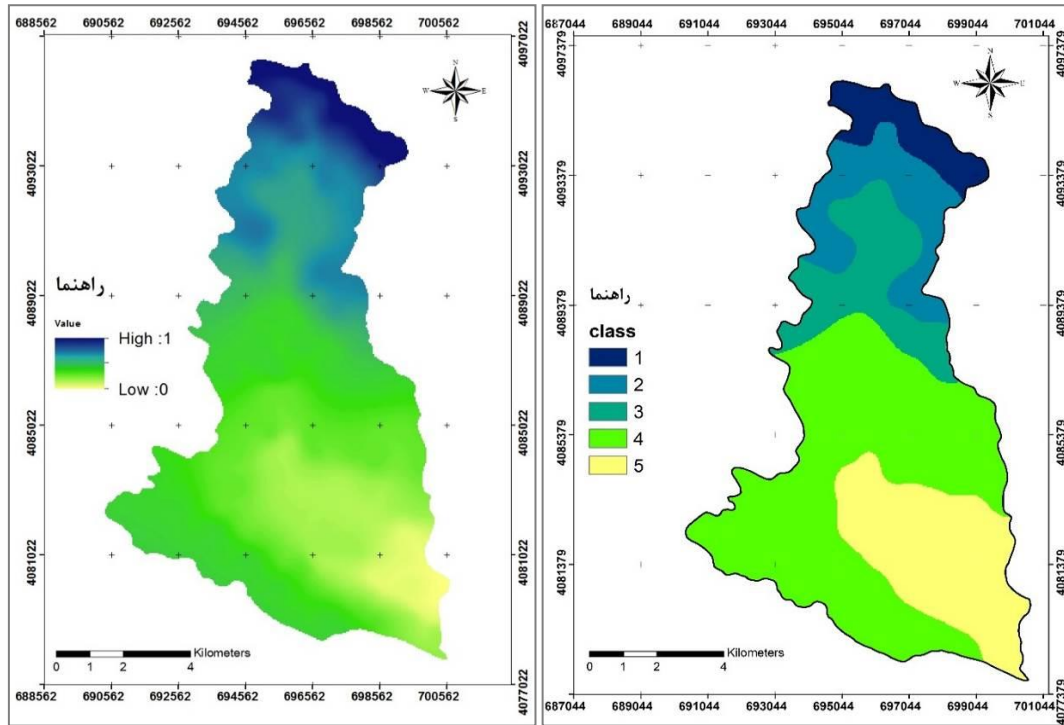
شکل ۷: وزن لیتولوژی حوضه بر اساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی



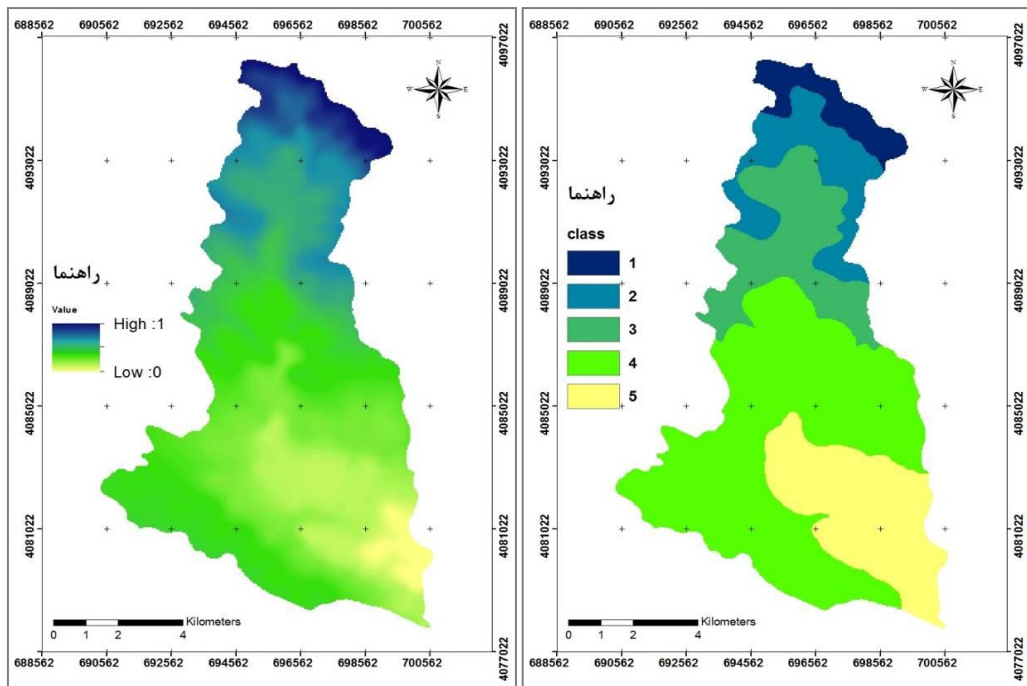
شکل ۸: وزن لایه فاصله از گسل‌های حوضه بر اساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی

پارامترهای هیدرواقليمی (بارش، دما و رودخانه)

با توجه به اینکه حجم بارش در توسعه کارست و پتانسیل آبهای کارستی نقش بسزایی دارد، اقدام به تهیه لایه اطلاعاتی بارش گردید. هرچه بارندگی بیشتر شرایط برای توسعه کارست فراهم تر می باشد. بارندگی بیشتر از ۳۰۰ میلیمتر شرایط مساعدی را برای توسعه کارست در یک منطقه دارد (شکل ۹).



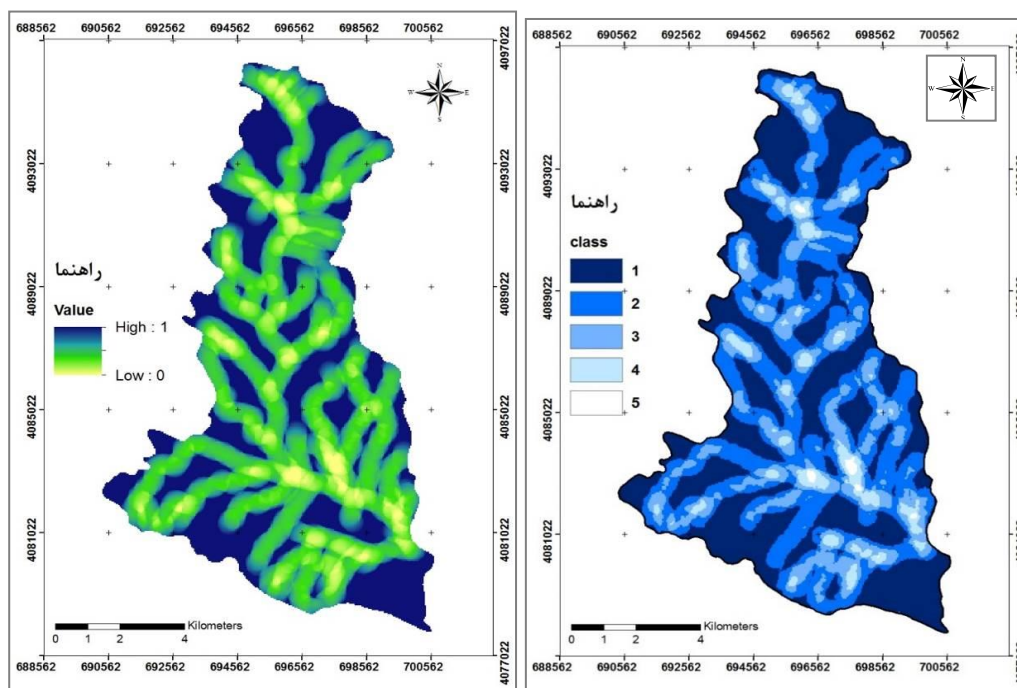
شکل ۹: وزن لایه همبارش حوضه براساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی



شکل ۱۰: وزن لایه همدمای حوضه براساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی



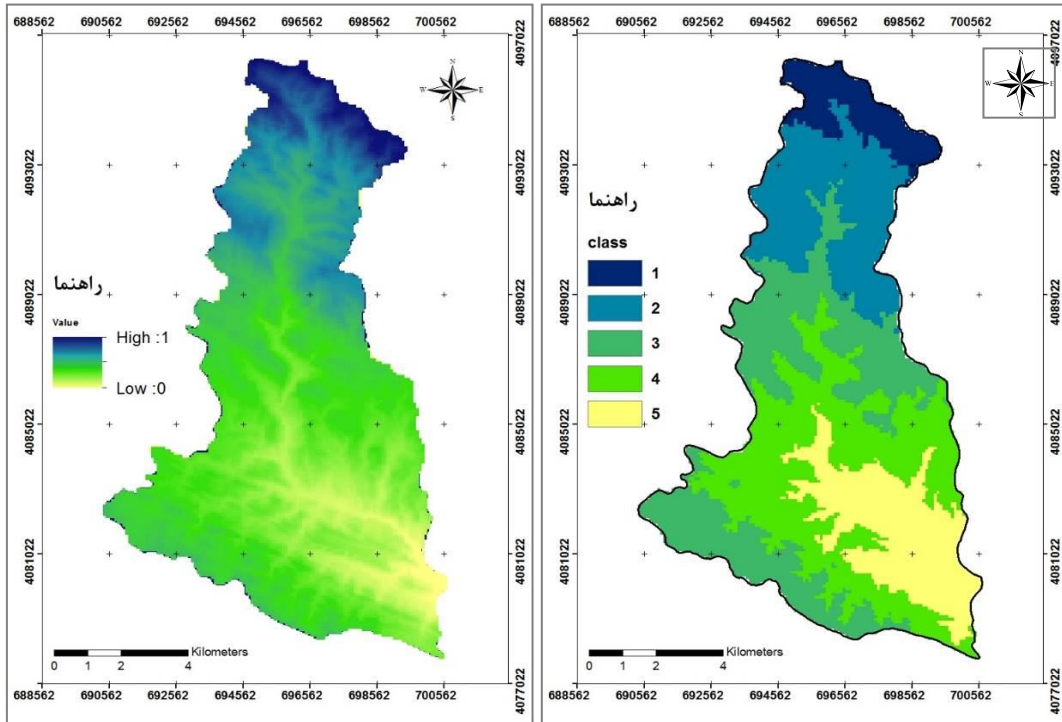
عامل مهم بعدی در توسعه کارست دما می باشد. هر چه دما کمتر توسعه کارست بیشتر صورت می گیرد. با توجه به آب و هوای سرد کوهستانی و رخنمون سنگی عربان در منطقه از یک رابطه خطی فزاینده جهت تعیین عضویت این لایه استفاده شده است. (شکل ۱۰) پارامتر هیدرواقليمی دیگر شبکه زهکشی است در مناطقی که شبکه زهکشی تراکم کمتری دارد پتانسیل انحلال بیش از سایر نواحی است این تابع در کارست زایی از یک رابطه خطی کاهنده پیروی می کند. (شکل ۱۱)



شکل ۱۱: وزن لایه فاصله از آبراهه های حوضه براساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی

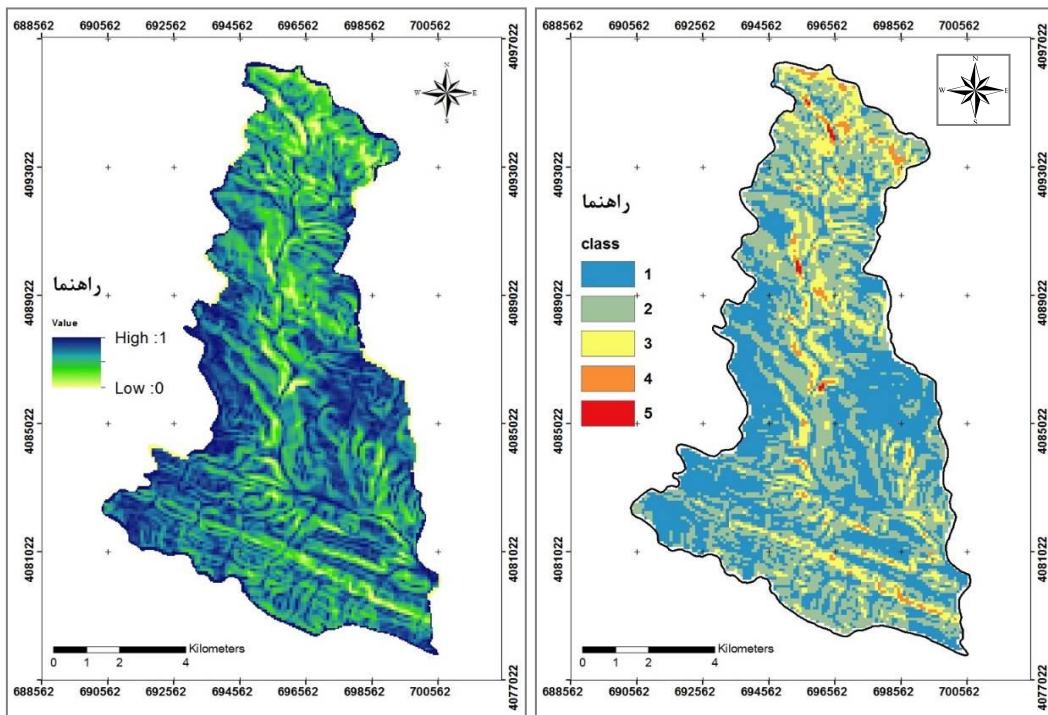
### پارامترهای توپوگرافیک (ارتفاع و شیب)

ارتفاع از پارامترهای فیزیکی مؤثر در میزان وقوع بارندگی و نوع آن، تبخیر و تعرق، دما و پوشش گیاهی است. به طور کلی توپوگرافی در تغذیه و تخلیه و برونزد چشمه های کارستی نقش مؤثری دارد. با افزایش ارتفاع میزان دما کاهش و میزان بارش افزایش می یابد و پتانسیل توسعه کارست به دلیل افزایش گرادیان هیدرولیکی، افزایش می یابد، بیشترین تحول یافتگی کارست در سطوح ارتفاعی بالا با شرط خلوص آهک مشاهده می شود (زرش و همکاران، ۱۳۹۳:۱۴۹) همچنین ارتفاع از سطح آبخوان، شرایط را برای جریان بیشتر سیال فراهم و انحلال را تشدید می کند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: وزن لایه طبقات ارتفاعی حوضه براساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی

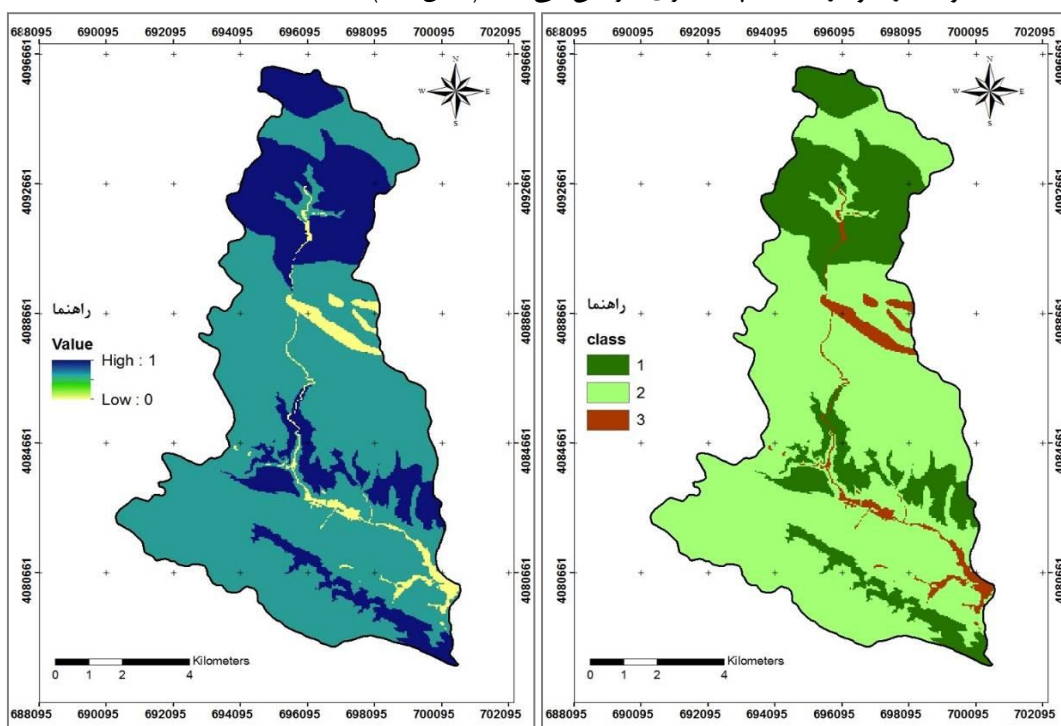
پارامتر توپوگرافیکی شیب نقش مهمی در سرعت رواناب و کاهش نفوذپذیری دارد، در مناطق پرشیب سرعت رواناب بیشتر و میزان نفوذ کمتر خواهد بود، بنابراین در مناطق پرشیب توسعه ی فرایندهای کارستیک با سرعت کندتری نسبت به مناطق کم شیب صورت می گیرد (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۰۲) (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: وزن لایه طبقات شیب حوضه براساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی

### پارامترهای بیولوژیک و آنتروپوژنیک (پوشش گیاهی و کاربری اراضی)

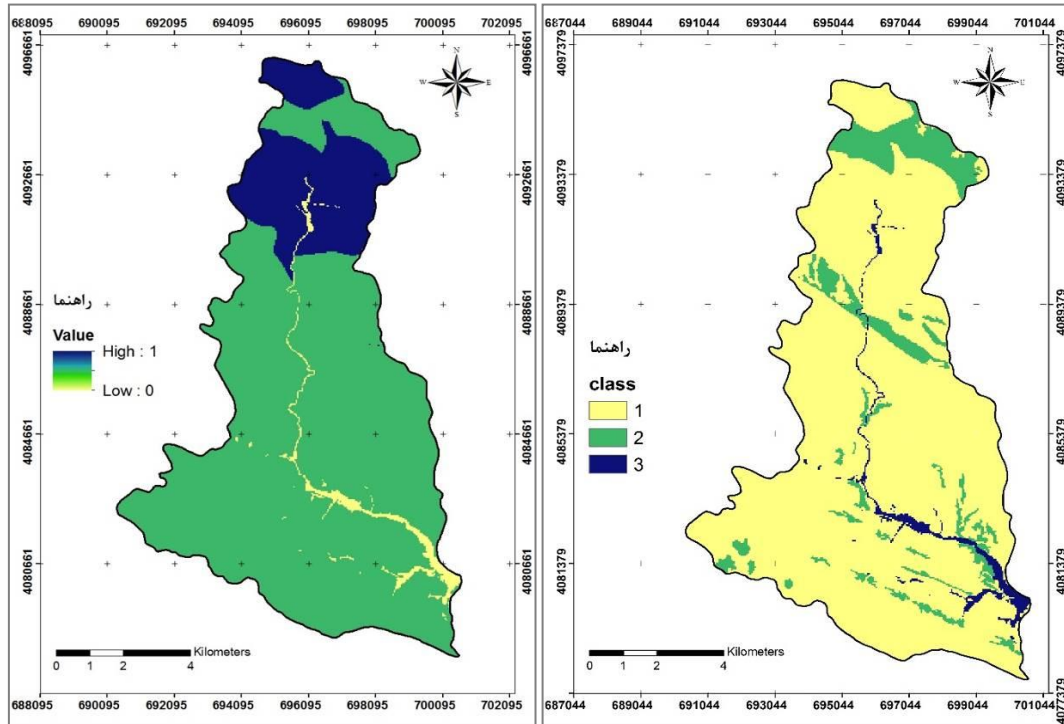
پوشش گیاهی سطح کارست اگر متراکم باشد، موجب جذب بارش و رطوبت شده و از طریق ریشه خود، این رطوبت و گاز کربنیک را همراه مقادیری اسید به سنگ آهک وارد می‌کند. همچنین بقایای گیاهان پوسیده شده، جانوران خاکری و قارچ‌ها در تولید گاز کربنیک و ترکیبات ارگانیکی بسیار مفید هستند و باعث تولید اسید هیومیک<sup>۱</sup> می‌شوند و در انحلال سنگ کربناته نقش مهمی را ایفا می‌کنند (به‌نیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۴: ۱۳۴) پوشش گیاهی سبب افزایش درز و شکافها در سازند سخت شده و مقدار نفوذ را به حد چشمگیری افزایش می‌دهد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: وزن لایه تراکم پوشش گیاهی حوضه براساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی

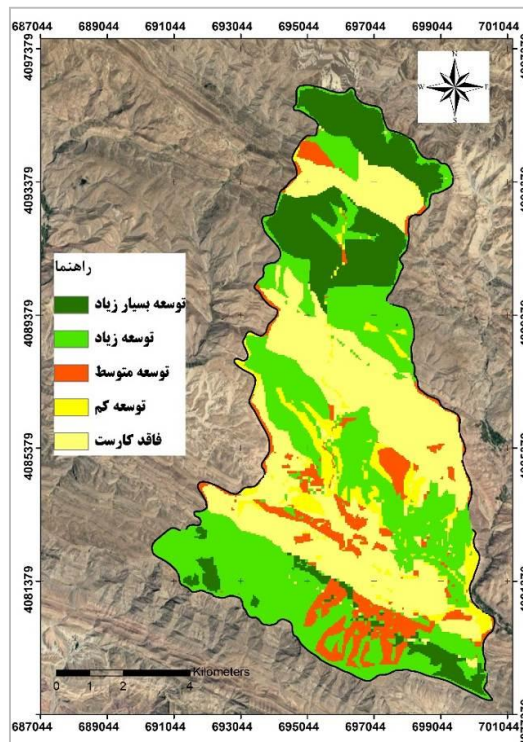
در لایه کاربری اراضی با افزایش پوشش گیاهی میزان کارستی شدن بیشتر می‌شود (شکل ۱۵).

<sup>۱</sup> Humic Acid



شکل ۱۵: وزن لایه نوع کاربری حوضه براساس روش تحلیل شبکه ای و تابع فازی

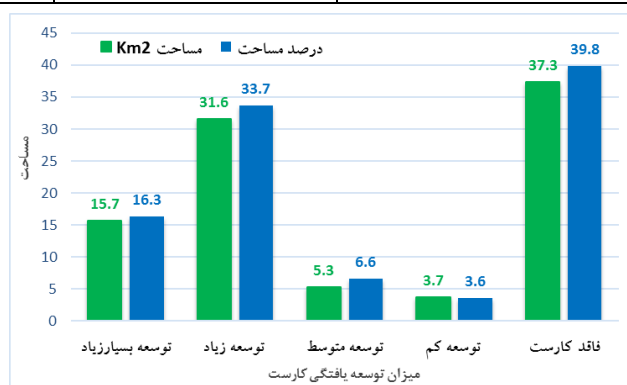
پارامترهای در نظر گرفته شده با استفاده از عملگر گاما ۰,۷، ۰,۸ و ۰,۹ رویهم گذاری شده و گامای ۰,۹ به دلیل مطابقت بیشتر با عوامل موثر در توسعه کارست حوضه مورد مطالعه به عنوان بهترین ضریب انتخاب و با استفاده از آن نقشه پهنه بندی توسعه کارست تهیه گردید. شکل شماره ۱۶ نقشه پهنه بندی مناطق مساعد توسعه کارست با گامای ۰,۹ را نشان می دهد.



شکل ۱۶: نقشه پهنه بندی مناطق مساعد توسعه کارست منطقه مورد مطالعه (حوضه بقمچ)

جدول ۵: مساحت پهنه های کارستی حاصل از مدل فازی با عملگر گامای ۰/۹

درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	طبقات میزان توسعه یافتگی کارست
۱۶,۳	۱۵,۷	کارست با توسعه بسیار زیاد
۳۳,۷	۳۱,۶	کارست با توسعه زیاد
۶,۶	۵,۳	کارست با توسعه متوسط
۳,۶	۳,۷	کارست کم توسعه یافته
۳۹,۸	۳۷,۳	فاقد کارست



شکل ۱۷: درصد و مساحت پهنه های میزان توسعه یافتگی کارست در منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۸: اشکال کارستی در ارتفاعات منطقه مورد مطالعه؛ (الف) کارن ها ، (ب) میکروکارن ها

در سیستم‌های کارستی توسعه یافته کل آب سیستم توسط چند چشمه محدود خارج میشود در نتیجه تعداد چشمه ها کم و آبدهی آنها قابل توجه می باشد. براساس آمار وزارت نیرو ۱۳ چشمه کارستی در منطقه وجود دارد که موقعیت و پراکنش آنها در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. پراکنش چشمه ها در جنوب و بخش پایین دست حوضه و بر روی سازندهای تیرگان و مزدوران می باشد. متوسط دبی سالانه این چشمه ها ۳ لیتر بر ثانیه می باشد. میزان دبی و تخلیه چشمه های مذکور در جدول شماره ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود فقط ۳ چشمه آبدهی بیشتر از ۵ لیتر در ثانیه دارند.

جدول ۶: آبدهی چشمه های کارستی منطقه مورد مطالعه (حوضه بقمچ)

مختصات چشمه های کارستی حوضه		متوسط سالانه دبی (lit/sec)
UTMX	UTMY	
694823	4083981	0.4
697145	4081040	0.6
698610	4080000	0.7
694698	4083903	1.5
694733	4083920	1.5
698160	4082113	2
698830	4080335	3
694738	4083909	3
699775	4080850	6
698195	4082135	7
699878	4080686	8

### نتیجه گیری

پس از تعیین عضویت برای هر یک از لایه های وابسته به پارامترهای مؤثر بر توسعه کارست نقشه ی نهایی پهنه بندی توسعه کارست بر اساس گامای ۰,۹ بدست آمد که در پنج سطح طبقه بندی شده است (شکل شماره ۱۶). با توجه به نقشه نهایی (شکل ۱۵)، شکل شماره ۱۷ و جدول شماره ۵؛ ۱۶/۳ درصد از مساحت کل منطقه در پهنه کارست با توسعه بسیار زیاد و ۳۳/۷ درصد از مساحت کل منطقه در پهنه کارست با توسعه زیاد و ۶/۶ درصد را پهنه کارست با توسعه متوسط به خود اختصاص می دهد و ۳/۶ درصد مساحت منطقه در طبقه کارست با توسعه کم و ۳۹/۸ درصد از مساحت حوضه فاقد کارست می باشد که منطبق بر سازند شوربجه و سرچشمه می باشد. قابلیت توسعه کارست و تشکیل اشکال کارستیک به عوامل مختلف بیرونی و درونی بستگی دارد، بسته به غلبه ی هر یک از این عوامل اشکال کارستیک بوجود می آید. از مهمترین عوامل درونی زمین شناسی می باشد که باعث پیدایش اشکال سطحی کارست می گردد و مهمترین عوامل بیرونی تأثیرگذار در منطقه ارتفاع، بارش و دما می باشد. نوع سازندهای زمین شناسی وجود سنگهای آهکی و کربناته مستعد انحلال موجب تشکیل اشکال کارستی در منطقه شده است. از نظر وجود و گسترش سنگهای کربناته با توجه به لیتولوژی واحدهای سنگ چینه ای رخنمون یافته در ارتفاعات منطقه، سازندهایی که تا حدودی دارای این شرط اولیه باشند شامل سازندهای مزدوران و تیرگان می باشند. در رابطه با شرایط تکتونیکی وجود شکستگی های اولیه و سیستمهای درز و شکاف در سنگهای کربناته، در مجموع به دلیل واقع بودن منطقه در زون کپه داغ\_ هزار مسجد و تحمل فشارهای تکتونیکی، واحدهای سنگ چینه ای فوق الذکر تا حدودی زیادی خرد شده و همراه با شکستگیهای اولیه می باشند. سیستمهای درز و شکستگی در سازندهای سخت این منطقه (تیرگان، مزدوران) که غالباً بصورت لوزی شکل یا عمود بر هم می باشند. وجود درز و شکاف در سنگهای آهکی باعث نفوذ آب در فضاهای خالی می گردد، این درز و شکافها در نتیجه تخریب مکانیکی و یا در اثر نیروهای تکتونیکی ایجاد می گردند. آهکی که تحت تاثیر نیروهای تکتونیکی قرار گرفته باشند امکان بیشتری برای توسعه ناهمواری کارستی دارند.

از نظر شرایط اقلیمی با توجه به موقعیت ارتفاعی و توپوگرافی، این منطقه نسبت به دیگر نواحی دشت مشهد از آب و هوای سردتری برخوردار بوده و دارای زمستانهای سرد و گرادیان متوسط بارش ۳۵۰-۲۵۰ میلی متر می باشد. انحلال سنگ آهک بر اثر عمل گاز کربنیک موجود در آب حاصل از نزولات جوی است. بنابراین پهنه هایی که دارای بیشترین میزان بارندگی نسبت به دیگر قسمتهای منطقه را دارند، شرایط بهتری را از نظر قابلیت گسترش و تحول کارست را دارد.

از نظر دما با توجه به اینکه حوضه مورد مطالعه یک حوضه کوهستانی با ارتفاع زیاد می باشد و در مناطق مرتفع که دارای دمای زیر صفر یا نزدیک به صفر می باشند و شرایط بارشی مناسب و میزان تبخیر کمتری دارند میزان توسعه کارست

بیشتر است. بنابراین در ارتفاعات و قسمت‌های پراکنده از بخش‌های مرکزی حوضه پهنه‌های با توسعه بالا کارست گسترش یافته‌اند. با توجه به موارد فوق الذکر عامل اصلی در توسعه کارست انحلال آهک می‌باشد. درجه انحلال آهک با درجه حرارت محیط نسبت عکس دارد و بنابراین سیستم کارستی در ارتفاعات توسعه بهتری نسبت به مناطق کم ارتفاع دارند. بازدید‌های میدانی از منطقه نشان می‌دهد حفرات کارستیک در سازند مزدوران بیشتر به چشم می‌خورد و در سازند تیرگان این حفرات کمتر وجود دارد (شکل ۱۸).

با توجه به اینکه بیش از ۷۰ درصد حوضه بقمچ از سازندهای انحلال پذیر تشکیل شده است، این منطقه باید از پتانسیل بالایی در خصوص آب زیرزمینی برخوردار باشد که وجود چشمه‌های کارستی در منطقه این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۶). با توجه به نقش کارست در تامین منابع آبی و مکانگزینی سکونتگاهها، پهنه بندی و تأثیر عوامل مؤثر در توسعه یافتگی مناطق کارستی از کارهایی است که در مناطق کارستی صورت می‌گیرد. استفاده همزمان از منطق فازی و روش (ANP) در تعیین ارجحیت و وزن معیارها نسبت به یکدیگر شرایط منطقی تر و انعطاف پذیرتری را برای ارزیابی مناطق کارستی فراهم می‌کند.

## منابع

- بهنیافر، ا.، قنبرزاده، ه.، ۱۳۹۵. ژئومورفولوژی کارست: فرآیندها و فرم‌های کارستی فیکاسیون با رویکرد مدیریت کاربری قلمروهای کارستی، انتشارات نگاران سبز، ۶۰۳ صفحه.
- پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان چناران شیت ۷۸۶۳
- جعفری، ت.، ارجمندزاده، ر.، ۱۴۰۰. شناسایی و تحلیل سیستماتیک غارها (مطالعه موردی: ۱۶ غار در استان خراسان شمالی)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۳، شماره ۴، صص ۵۵۵-۵۳۱.
- حاجی زاده وادقانی، ب.، بالیست، ج.، کریمی، س.، ۱۳۹۷. مکان یابی توسعه شهری با منطق فازی و ترکیب خطی وزنی و تکنیک تصمیم گیری فرایند تحلیل شبکه ای مطالعه ی موردی: شهرستان کاشان، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۷، شماره ۱، صص: ۲۳۲-۱۱۹.
- حجازی، م.، حیدری، ز.، ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه بندی مناطق توسعه یافته و مستعد آلودگی کارستیک (مطالعه موردی حوضه آبریز روانسر)، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۲۳، شماره ۶۸، صص: ۳۲۶-۳۱۳.
- حیدری، ز.، قدیمی، م.، رضایی عارفی، م.، حیدری، ز.، ۱۳۹۹. شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و وقوع فروچاله‌ها با استفاده از شاخص‌های کمی مورفومتریک (مطالعه موردی: دشت کرمانشاه)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال نهم، شماره ۲، صص: ۲۲۶-۲۱۵.
- خدمت زاده، ع.، حسنی، م.، ۱۳۹۹. پهنه بندی سیلاب حوضه آبریز شهر چایی ارومیه با استفاده از مدل Fuzzy\_ANP ، مهندسی جغرافیایی سرزمین، دوره چهارم، شماره ۷، صص: ۸۳-۷۰.
- خضری، س.، شهابی، ه.، محمدی، س.، ۱۳۹۶. ارزیابی و پهنه بندی تحول کارست حوضه آبریز غار سهلان مهاباد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۶، شماره ۱، صص: ۳۹-۲۱.
- خوشرفقار، ر.، جعفری، غ.، فیض اله پور، م.، آربین تبار، ح.، مرادی، پ.، ۱۳۹۸. ارزیابی ارتباط گسلها با چشمه‌های کارستی در توده کوهستانی پراو بیستون-کرمانشاه، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال نوزدهم، شماره ۴۵، صص: ۲۲-۱.
- دسترنج، ع.، نوحه‌گر، ا.، رفیع شریق آباد، ج.، ۱۳۹۸. پهنه بندی توسعه کارست سطحی در توده آهکی بیستون با استفاده از مدل منطق فازی، مجله آمایش جغرافیایی فضا، سال ۹، شماره مسلسل ۳۲، صص: ۱۰۶-۸۹.
- رضایی عارفی، م.، زنگنه اسدی، م.، بهنیافر، ا.، جوانبخت، م.، ۱۳۹۹. شناسایی درجه کارستی شدن حوضه کوهستانی کلات در شمال شرق ایران، فصلنامه فضای جغرافیایی، پیاپی ۷۱ صص: ۷۴-۴۹.

- رضایی عارفی، م.، زنگنه اسدی، م.، بهنیا فر، ا.، جوانبخت، م.، ۱۳۹۹. پهنه بندی تحول کارست با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: حوضه کوهستانی کلات، خراسان رضوی)، جغرافیا (فصلنامه علمی پژوهشی و بین المللی انجمن جغرافیایی ایران)، سال ۱۸، شماره ۶۴، صص: ۹۴-۷۹.
- زاهدی، ا.، جهانبخشی، ف.، طالبی، ع.، ۱۳۹۵، مکانیابی مناطق مستعد پخش سیلاب با استفاده از منطق فازی و فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP) (مطالعه موردی: دشت مشهد)، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۲۰، شماره ۷۶، صص: ۱۹۶-۱۸۵.
- زروش، ن.، واعظی، ع.، کریمی، ح.، ۱۳۹۳، ارزیابی پتانسیل توسعه کارست در تاقدیس کبیرکوه استان ایلام با استفاده از تلفیق فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و و سنجش از دور و (GIS)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۳، صص: ۱۵۷-۱۴۴.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ گاه ۱ 7863 I و رادکان K 753 7863 IV سری 7863 IV صفاری، ا.، قنوتی، ع.، علیجانی، ف.، محمدی، ز.، ۱۳۹۵، مروری بر خصوصیات لندفرم های کارستی در لایه های گچی، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۴، صص: ۳۹-۱۷.
- صفاری، ا.، گنجائیان، ح.، حیدری، ز.، فریدونی کردستانی، م.، ۱۳۹۷، تعیین مناطق کارست توسعه یافته با استفاده از مدل های منطق فازی و OWA در حوضه قره سو، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۵، صص: ۱۱۴-۹۵.
- صفاری، ا.، کیانی، ط.، زنگنه تبار، س.، ۱۳۹۸، بررسی عوامل موثر در توسعه یافتگی و پهنه بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۹، شماره ۵، صص: ۳۶-۲۳.
- صفاری، ا.، پی سوزی، ت.، احمدآبادی، ع.، ۱۴۰۰، ارزیابی و تحلیل مناطق کارستیک توسعه یافته و آسیب پذیر (مطالعه موردی: توده کارستیک خورین در استان کرمانشاه) پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳۹، صص: ۲۰۰-۱۸۹.
- فرزین کیا، ر.، امیراحمدی، ا.، زنگنه اسدی، م.، زندی، ر.، ۱۴۰۰، پهنه بندی خطر فرونشست زمین در دشت جوین با استفاده از مدل تحلیل شبکه ای\_ فازی، فصلنامه علمی فضای جغرافیایی، سال بیست و یکم، شماره ۷۴، صص: ۷۱-۵۱.
- قدیمی، م.، زنگنه تبار، س.، ۱۳۹۸، ارزیابی مناطق مناسب تغذیه آبخوان کارستی پرآو-بیستون با استفاده از مدل KARSTLOP، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، سال ۸، شماره ۱، صص: ۱۵-۱.
- قربانی، ز.، شهیدی، ع.، احمدی، م.، صیادی، ع.، ۱۴۰۰. پهنه بندی کیفی آب شرب با استفاده از روشهای ANP و FANP (مطالعه موردی: دشت بیرجند)، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و سوم، شماره ۱، صص: ۱۷۰-۱۶۲.
- قربان نیا خیبری، و.، لیاقتی، ه.، میرسنجری، م.، آرمین، م.، ۱۳۹۸، کاربرد فرآیند تحلیل شبکه های و منطق فازی (ANP-FUZZY) در شناسایی منطقه های توسعه گردشگری طبیعت در شهرستان دنا، فصلنامه علوم محیطی، دوره هفدهم، شماره ۳، صص: ۴۴-۲۹.
- مددی، ع.، همتی، ط.، ۱۳۹۴، پهنه بندی قابلیت کارست زایی با استفاده از مدل منطق فازی (مطالعه موردی: منطقه نمک آبرود شهرستان چالوس)، دو فصلنامه ی ژئومورفولوژی کاربردی ایران سال ۳، شماره ۵، صص: ۱۰۲-۸۹.
- مزیدی، ا.، کرم، ا.، کوراوند بردپاره، م.، ۱۳۹۵، پتانسیل یابی توسعه کارست با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: دشت سوسن و دشت ایذه)، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۲، صص: ۱۴۱-۱۳۰.
- 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: ۹۳-۷۳.
- مکرم، م.، نگهبان، س.، ۱۳۹۷، بررسی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن با استفاده از روش فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دوره ۳۰، شماره ۲، صص: ۱۳۴-۱۲۱.
- ولایتی، س.، ۱۳۹۴، کارست ژئومورفولوژی، صحرا شرق کیمیا، ۲۰۲ صفحه.



- هاشم زاده، ن.، ولیزاده کامران، خ.، ۱۴۰۱، پهنه بندی خطر ناپایداری دامنه‌های در شهرستان گرمی به روش (ANP)، کاربرد سنجش از دور و (GIS) در علوم محیطی، شماره ۶، سال ۱، صص: ۲۲-۱.
- یمانی، م.، داورزنی، ز.، دادرسی، ا.، ۱۳۹۱. ارزیابی مدل منطق فازی در مقایسه با سایر مدل‌های مفهومی در پهنه بندی سیل خیزی با تاکید بر ویژگی های ژئومورفولوژیک، موردشناسی: حوضه داورزن، جغرافیا و آمایش شهری\_منطقه ای سال ۲، شماره ۵، صص ۱۳۴-۱۲۱.
- Abusaada M., Sauter M., 2017. Recharge Estimation in Karst Aquifers by Applying Water Level Fluctuation Approach. *International Journal of Earth Science and Geophysics*, Vol 3:013.
- Cahalan M., Milewski D., Adam M., 2018. Sinkhole formation mechanisms and geostatistical based prediction analysis in a mantled karst terrain, *Catena* 165 333–344, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.010>.
- Chen Y.F., Liao Z., Zhou J.Q., Hu R., Yang Z., Zhao X.J., Wu X.L., Yang X.L., 2020. Non-Darcian flow effect on discharge into a tunnel in karst aquifers, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 130, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104319>
- Das S., Chakraborty S., 2011. Selection of non-traditional machining processes using analytic network process. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.30 No.1, pp: 41-53.
- Elshall A.S., Castilla-Rho J., El-Kadi A.I., Holley C., Mutongwizo T., Sinclair D., Ye M., 2022. Sustainability of Groundwater, Imperiled: The Encyclopedia of Conservation, pp: 157-166. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821139-7.00056-8>
- Eskandari E., <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821139-7.00056-8> Mohammadzadeh H., Nassery H., Vadiati M., Mohammadzadeh A., Kisi O., 2022. Delineation of isotopic and hydrochemical evolution of karstic aquifers with different cluster-based (HCA, KM, FCM and GKM) methods, *Journal of Hydrology*, vol 609, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127706>
- Ford D, C., Williams, P., 2007. *Karst Geomorphology and Hydrology*, Unwin Hyman, London, UK.
- Jun-ying R., Tao X., Yuan-ming L., 2016. Fuzzy Evaluation Model for In-service Karst Highway Tunnel Structural Safety, *KSCE Journal of Civil Engineering* 20(4):1242-1249.
- Hartmann A. Goldscheider; N .Wagener; T .Lange, J. Weiler; M. 2014, *Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches*, *American Geophysical Union (AGU) Reviews of Geophysics*, 10.1002/2013RG000443.
- Lvarez I., del V., Miren G., Maidagan D., Legarrea J., 2017. Geological risk assessment for rock art protection in karstic caves (Alkerdi Caves, Navarre, Spain), *Journal of Cultural Heritage*, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.01.017>.
- Milanovic, P.T. 2004, *Environmental Geology*. Volume 47, Issue 8, pp: 1177-1178.
- Mizanur Rahaman M., Varis O., Kajander T., 2004. EU Water Framework Directive vs. Integrated Water Resources Management: The Seven Mismatches, *Water Resources Development*, Vol. 20, No. 4: 565±575.
- Parise, M., 2016, *Management of water resources in Karst environments, and negative effects of landuse Changes in the Murge area (Apulia, Italy)*, *Karst Development: Orginal Papers*, Volume 2., Issue 1:16-20.
- Oikonomidis D., Dimogianni S., Kazakis N., Voudouris K., 2015. A (GIS )/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*, 525, 197-208. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.056>.
- Quiroz L.O.M., Romanelli A., Lima M. L., Massone H.E., Martínez D.E., 2016, *Fuzzy logic-based assessment for mapping potential infiltration areas in low-gradient*

watersheds. *Journal of Environmental Management*, vol 176, 101-111. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.038>.

- Ruggieri R., Davtyan S., Shaihinyan S., 2022, Armenian karst project. *Carbonates Evaporites* 37, 14. <https://doi.org/10.1007/s13146-021-00755-0>
- Romanov D., Gabrovs̃ek F., Dreybrodt W., 2003. Dam sites in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam. *Engineering Geology* 70 :17–35.