بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP، استان کرمانشاه

مجتبی یمانی [۱*]، علی‌اکبر شمسی‌پور [۲]، مریم جعفری‌اقدم [۳] و سجاد باقری سید شکری [۴]

[۱] دانشیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] استادیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۴] دانشجوی دکتری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۱۶

چکیده

حوضه چله در جنوب استان کرمانشاه و در واحد زاگرس چین‌خورده قرار دارد. با توجه به گستردگی سازندهای آهکی، وجود گسل‌ها و درزه‌های زمین‌ساختی، لندفرم‌های کارستی تکامل‌یافته‌ای در این حوضه شکل گرفته است. هدف این پژوهش، بررسی توسعه‌یافتگی کارست و میزان تأثیر عوامل مختلف در نفوذپذیری سازندها است. داده‌های اصلی پژوهش را نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی و نیز عکس‌های هوایی به همراه داده‌های آب‌شناسی وزارت نیرو تشکیل داده‌اند. در مطالعه موجود ۹ عامل محیطی به عنوان متغیرهای مستقل و زمین‌ریخت‌شناسی شکل‌های کارستی به عنوان متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفتند. نخست معیارها و عوامل کمی و کیفی شناسایی شد. سپس با انجام کارهای میدانی و پرسش‌نامه، این معیارها و عوامل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی تجزیه و تحلیل شدند. در پایان در محیط GIS نقشه‌های همپوشانی تهیه و یکسان‌سازی عوامل و تصحیح پایانی با کمک منطق فازی انجام شد. به منظور نتیجه‌گیری بهتر، منطقه از نظر توسعه و تحول کارست به چهار بخش تقسیم شد. تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، نقش مؤثر سنگ‌شناسی (سازند آسماری) را در فرایند توسعه‌یافتگی کارست نشان می‌دهد. همچنین کارست در بلندی‌های جنوبی حوضه و زمین‌های مسطح در رأس تاقدیس شمالی و نیز در امتداد گسل اصلی منطقه توسعه‌یافتگی کامل‌تری دارد. مناطق توسعه‌یافته کارست ۱۰۷/۹۵ کیلومتر مربع یا به عبارتی ۲۲/۵ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است. همچنین پهنه با توسعه متوسط کارست ۳۴ درصد از مساحت حوضه را پوشش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: کارست، مدل AHP، منطق فازی، حوضه چله، فرسایش.

***نویسنده مسئول:** مجتبی یمانی
E-mail: myamani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

واژه کارست به مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از انحلال سنگ‌های آهکی گفته می‌شود که با تجزیه و تخریب ساختمان این سنگ‌ها، رژیم آب‌شناختی بی‌همتایی شکل می‌گیرد و به تشکیل لندفرم‌های ویژه‌ای می‌انجامد (وزارت نیرو، تماب، ۱۳۷۳). عوامل مؤثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و وضعیت هیدروژئولوژیکی تقسیم می‌شوند. روی هم‌رفته ۸ عنصر لازم برای ایجاد و توسعه کارست، بارش‌های آسمانی، ناهمواری‌ها، سنگ‌شناسی، ستبرای لایه‌های کربناتی، کربن، دمای پایین، فشار و موقعیت زمین‌ساختی هستند (White, 1988). آب داخل درز و شکاف سنگ‌های قابل انحلال مثل کربنات‌کلیسم نفوذ نموده و موجب توسعه درز و شکاف‌ها شده و سازند کارستی را پدید می‌آورد (Mull et al, 1988) تحول و توسعه کارست تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد که در این میان نقش ترکیب‌سنگی و ویژگی‌های آن و عوامل ساختاری همچون گسل‌ها و درزه‌ها اهمیت زیادی دارد. لندفرم‌های کارستی در مسیرهایی شکل می‌گیرند که توسط عوامل ساختاری کنترل می‌شوند (Ford & Wiliams, 1989). وجود درز و شکاف‌های زمین‌ساختی همراه با فعالیت‌های انحلالی شرایط را برای نفوذ آب به صورت متلاطم در راستای ژرفا و قرارگیری بیشتر سنگ‌ها (در واحد سطح) در معرض عامل انحلالی فراهم می‌کند. در بیشتر سنگ‌های آهکی و دولومیتی، نفوذپذیری مؤثر، در کنترل سطح لایه‌بندی محل تقاطع یا برخوردهای ساختاری و درزه‌هایی است که حاصل شرایط رسوب‌گذاری هستند یا در اثر دیاژنز و فعالیت‌های زمین‌ساختی حاصل شده‌اند. پهنه‌های کارستی در شمال باختری زاگرس به‌ویژه در استان کرمانشاه نقش مهمی در تغذیه آبخوان‌ها دارند. وجود بیش از ۵۵۰ سراب و چشمه کارستی در استان کرمانشاه نقش بسیار حیاتی در تأمین آب آشامیدنی و مصارف صنعتی و کشاورزی دارد (ملکی و شوهانی، ۱۳۸۶).

با توجه به اهمیت مناطق کارستی در تغذیه منابع آب زیرزمینی، پژوهش‌های به نسبت جامعی در رابطه با کارست در ایران و به‌ویژه زاگرس صورت گرفته است که در این میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

پژوهش انجام شده در مورد تحول کارست در کوه پراو- بیستون و نقش آن در تغذیه آبخوان‌های کارستی نشان داد که ویژگی‌های زمین‌ساختی، زمین‌شناسی و اقلیم گذشته سبب توسعه و تحول کارست در این منطقه است و عوارض کارستی نقش زیادی در تغذیه منابع آب زیرزمینی دارند (ملکی و محمودی، ۱۳۸۰). عشقی و ثروتی (۱۳۸۳) به مطالعه ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی مناظر کارستی در حوضه کارده در کپه‌داغ پرداختند و دریافتند که وجود سازندهای آهکی و تخلخل ثانویه به صورت درز و شکاف مهم‌ترین عوامل مؤثر در توسعه کارست منطقه هستند. ملکی و شوهانی (۱۳۸۶) به مطالعه و پهنه‌بندی تحول کارست استان کرمانشاه با استفاده از GIS و مدل‌های مفهومی AHP پرداختند و تراکم سطح، ارزش اطلاعاتی، روش تجربی و روش آماری را به عنوان متغیرهای تأثیرگذار انتخاب کردند. سپس متغیرهای ارتفاع، ترکیب‌سنگی، زمین‌ریخت‌شناسی، دما، بارش، تبخیر و شیب و نقشه‌های پهنه‌بندی به‌دست آمده از مناطق مختلف استان را از نظر درجه توسعه‌یافتگی کارست و همچنین 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 یاوری 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 حوضه الوند در جنوب باختری استان کرمانشاه پرداختند. نتایج

نشان داد که زمین‌ساخت با انواع ساخت‌های خطی و صفحه‌ای سبب ایجاد سامانه تنوع درز و شکاف در سازندهای کربناتی و با ایجاد تخلخل ثانویه سبب توسعه کارست در منطقه شده است. وجود چشمه‌های فراوان همچون سراب گیلانغرب در پیرامون بلندی‌های حوضه چله نشان از ارتباط نزدیک منابع آب زیرزمینی با توسعه کارست در حوضه دارد، از این‌رو، این مسئله با بسیاری از فعالیت‌های انسانی همچون تأمین آب آشامیدنی شهر گیلانغرب و روستاهای پیرامون، آب کشاورزی زمین‌های دشت چله و گیلانغرب، ایجاد طرح‌های صنعتی و گردشگری دریاچه مصنوعی و سد منطقه ارتباط پیدا می‌کند. بنابراین شناخت میزان توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی سطح حوضه از این نظر با توجه به تأثیر آن در بیلان آبی منطقه ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش از نوع توسعه‌ای- کاربردی است که هدف آن، بررسی نقش و میزان تأثیر هر یک از عوامل مورد بررسی در توسعه‌یافتگی کارست، پهنه‌بندی حوضه از نظر توسعه‌یافتگی با استفاده از مدل‌های ریاضی و همچنین دست‌یابی به میزان کارآیی مدل‌های بالا در مطالعات مربوط به موضوع کارستی است.

۲- حوضه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه چله در پهنه شمال باختری زاگرس در جنوب باختری استان کرمانشاه منطبق بر محدوده سیاسی دهستان چله (بخش مرکزی شهرستان گیلانغرب) قرار گرفته است (شکل ۱). رودخانه چله از بلندی‌های قلاجه سرچشمه می‌گیرد و با مسیر شمال باختری در ناودیس چله جریان می‌یابد. این رودخانه بر پایه دسته‌بندی وزارت نیرو، جزو حوضه آبخیز رود الوند است و به خلیج فارس می‌ریزد. این حوضه با گسترشی برابر با ۴۸۳/۵ کیلومتر مربع میان عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه خاوری قرار گرفته است. از دید سنگ‌شناسی از واحدهای گورپی، پابده، آسماری، گچساران، آغاجاری، بختیاری، فارس و نهشته‌های کواترنری تشکیل شده است.

۳- مواد و روش‌ها

این کار یک پژوهش توسعه‌ای - کاربردی است که بر روش‌های میدانی، ابزاری و کتابخانه‌ای متکی است. نخست با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، محدوده حوضه مورد مطالعه مشخص شد. داده‌های اصلی پژوهش، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس‌های هوایی ۱:۵۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای IRS سال ۲۰۰۲، آمار بارش و دما هستند. به منظور بررسی نقش عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست منطقه، ۹ عامل ترکیب‌سنگی، آب‌شناسی، کاربری زمین، زمین‌ساخت (درز و شکاف‌ها)، ارتفاع، بارش، شیب، سوی شیب و نوع زمین‌ها به عنوان متغیرهای مستقل و ریخت‌زمین‌شناسی شکل‌های کارستی به عنوان متغیر وابسته مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست در این پژوهش بررسی و در ادامه مدل رقومی ارتفاع و نقشه شیب، سطوح ارتفاعی و ترکیب‌سنگی رسم شدند. در طی عملیات میدانی لندفرم‌های کارستی حوضه شناسایی و از آنها عکس‌برداری شد. در همین راستا، ۲۰ نمونه در زمینه ابعاد و سوی شکل‌های کارستی، درزه‌ها و شکاف‌ها در ابعاد ۳۰ متری برداشت شد که در نتیجه، منطقه از دید تراکم درز و شکاف پهنه‌بندی شد. معیارها و عوامل کمی و کیفی شناسایی و با روش‌هایی چون مصاحبه و تهیه پرسشنامه، این معیارها و عوامل غربال و موارد مؤثر به طور عام مشخص شد. سپس عامل ترکیب‌سنگی با ۹ طبقه، زمین‌ساخت با ۵، ارتفاع با ۳، شیب توپوگرافی با ۵، سوی شیب با ۴، نوع زمین‌ها با ۳، کاربری زمین (پوشش گیاهی) با ۷، رودخانه با ۳ و آب و هوایی وارد مدل AHP شده و ضرایب آنها به روش مقایسه دو به دوی، محاسبه شد (شکل ۲). در مرحله بعد، شاخص‌ها و متغیرهای مؤثر در توسعه کارست، با استفاده از تابع فازی زیر فازی‌سازی شده و در این مرحله همه لایه‌های مطالعاتی به صورت استاندارد قابل مقایسه در آمدند.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x > a \\ (x_{max} - x) / \Delta x & b > x > a \\ 0 & b > x \end{cases}$$

الگوریتم‌های منطق فازی که برای اولین بار توسط Lotfi -Zadeh (1965 & 1975) معرفی شد، از جمله مدل‌های شبکه‌های عصبی است که برای اقدام در شرایط عدم اطمینان ارائه شد. این نظریه می‌تواند بسیاری از مفاهیم، متغیرها، شاخص‌ها و سامانه‌های نامشخص و مبهم را صورت‌بندی ریاضی ببخشد و زمینه را برای استدلال، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط نامطمئن فراهم کند (Mahonen, & Frantti, 2000). یک مجموعه فازی یک تابع عضویت دارد که درجه عضویتی میان صفر و یک به سری می‌دهد. عضویت یک درجه معین از تعلق شی به مجموعه فازی را نمایش می‌دهد (Al-Mohseen, 2009). نقشه‌های توابع فازی مورد بحث ما در این پژوهش از نوع خطی هستند که در شکل ۳ دیده می‌شوند.

ضرایب به پایگاه داده‌های توصیفی لایه‌های چند ضلعی GIS منتقل شد. انتقال ضرایب به لایه‌های GIS موجب کمی شدن و نیز قابل‌مقایسه شدن لایه‌ها می‌شود. سپس برای انجام مدل همپوشانی، لایه‌ها با استفاده از ضرایب اعمال شده AHP از ساختار برداری به نرده‌ای تبدیل می‌شوند. عوارض نقطه‌ای با روش درون‌یابی (Inverse Distance Weighted) و لایه‌های خطی با تعریف فاصله به لایه‌های چندضلعی و سپس به نقشه رستری تبدیل شدند. در پایان با همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر، نقشه پایانی حاصل شد. برای انجام یکسان‌سازی بیشتر میان لایه‌ها و رفع خطاهای احتمالی از روش منطق فازی استفاده شد. سپس برای بررسی نتایج و نقشه‌های به‌دست آمده از مدل‌های مفهومی و تعیین دقت آنها، نواحی تکامل‌یافته کارستی با استفاده از تصاویر IRS، نقشه‌های توپوگرافی و بازدیدهای میدانی با محدوده چاله‌های بسته و پولیه‌ها مشخص شدند. نقشه شکل‌های کارستی حوضه به عنوان متغیر وابسته مورد مقایسه قرار گرفت تا مناسب‌ترین مدل در زمینه توسعه شکل‌های کارستی مشخص شد. از نرم افزارهای ENVI 4.3 و Corel x4 نیز برای تفسیر دیداری، آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نیمرخ‌های مورد نیاز استفاده شده است.

۴- بحث

نقشه‌های ۹ متغیر مؤثر در کارستی شدن منطقه به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفتند. در ارتباط با ویژگی‌های سنگ‌شناختی، به علت وجود سازند آهک آسماری با مساحتی در حدود ۴۳/۵ درصد از مساحت حوضه (۲۰۹ کیلومتر مربع)، ستبرایی بیش از ۴۰۰ متر در دو تاقدیس شمالی و جنوبی و همچنین قرار گرفتن حدود ۹۰ درصد شکل‌های کارستی در این سازند، ترکیب‌سنگی به عنوان مهم‌ترین عامل در توسعه فرایند کارست منطقه مطرح است. این سازند با سن الیگوسن تا میوسن پیشین از دید ترکیب‌سنگی از تناوب سنگ‌آهک نازک تا متوسط لایه کرم‌رنگ و مارن تشکیل شده است. از دید تناوب لایه‌ها، سازند آسماری در رأس تاقدیس‌ها، در سطح رخنمون دارد و در زیر آن سازندهای پابده و گورپی قرار دارند، در کف ناودیس نیز لایه آسماری در زیر نهشته‌های کواترنری گچساران و آغاجاری مدفون شده است (شکل ۴). بنابراین بیشترین میزان نفوذ آب را می‌توان در گستره این سازند مشاهده کرد. نقشه‌های به‌دست آمده از مدل‌های AHP و فازی، برتری آهک آسماری و اهمیت عامل ترکیب‌سنگی را نشان می‌دهند (شکل ۵).

درزها و شکستگی‌ها نیز مهم‌ترین عامل هدایت آب در سنگ‌های کربناتی هستند (رضایی و زمانی، ۱۳۷۷). بر پایه نتایج به دست آمده از مدل‌های مورد استفاده، زمین‌ساخت دومین عامل تأثیرگذار در فرایند توسعه کارست در منطقه است. این متغیر در دو بخش فاصله از گسل و درز و شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. گسل یک خط شکستگی منفرد نیست، بلکه همواره به صورت سامانه گسلی و همراه با سامانه درز و شکاف، سنگ‌های پیرامون خود را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

بی‌گمان با فاصله از این خطوط، از میزان درز و شکاف کاسته می‌شود. گسل‌های اصلی منطقه در رأس و دامنه تاقدیس‌ها قرار گرفته‌اند. بیشترین محل برخورد این گسل‌ها با سازند آهک آسماری است. این مسئله می‌تواند سبب تأثیر بیشتر گسل‌ها در کارستی شدن منطقه شود، زیرا سبب شکل‌گیری درزه‌های زمین‌ساختی در سازند مورد نظر می‌شود که شتاب در کارستی شدن را به دنبال دارد. به این منظور، گسل‌های منطقه جدا از ناودیس و تاقدیس‌های آن مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۶).

درزه‌های موجود در واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه بیشتر از دسته درزهایی هستند که منشأ زمین‌ساختی دارند و در امتداد گسل‌ها شکل گرفته‌اند. در صورتی‌که درزه‌های غیرسیستماتیک در نتیجه برداشت بار یا کاهش فشار روی طبقات طی فرسایش و فرایند یخ‌شکافتی حاصل شده‌اند و جهت‌های مختلف دارند. در تاقدیس‌های منطقه، خط‌واره‌هایی با جهت N۲۰ – ۳۰E در راستای عمود بر محور تاقدیس و در سوی اصلی تنش P1 قرار دارند. خط‌واره‌های با سوی N۱۲۵ ـ ۱۳۰E در راستای صفحه محوری تاقدیس و عمود بر نیروهای فشار دیده می‌شوند. این خط‌واره‌ها شامل درزه‌ها و شکستگی‌های کششی و رهایی هستند (قصی اویلی، ۱۳۷۶). نتایج حاصل از ۲۰ نمونه برداشت‌شده در ابعاد ۳۰ متر مربعی در سازند آسماری در ۳ طبقه ارتفاعی در جدول ۲ آمده است. بیشترین تراکم درزه‌ها در سطوح ارتفاعی بالاتر و نزدیک گسل‌ها است. افزون بر دو سوی اصلی بیان شده، بی‌نظمی زیادی نیز در جهت درزه‌ها دیده می‌شود.

در طبقه ارتفاعی ۱ به علت رخنمون کمتر سازند آسماری و دخالت کمتر فشارهای زمین‌ساختی و فرایندهای کریوکلاستی، ستبرا، طول و مساحت درزها در منطقه کمتر از دو طبقه دیگر است. در طبقه ارتفاعی ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ متر به علت نزدیک شدن به رأس تاقدیس، دخالت عامل زمین‌ساخت و فرایند کریوکلاستی (بیشتر شدن ارتفاع) نیز بیشتر می‌شود. در طبقه ارتفاعی بیش از ۱۸۰۰ متر به علت قرار گرفتن در رأس تاقدیس و وجود گسل‌های وارون و بیشتر بودن فشارهای زمین‌ساختی، می‌توان شاهد افزایش ستبرا، طول و درصد مساحت درزها بود. با توجه به بررسی‌های میدانی و نتیجه به‌دست آمده از مدل های AHP و فازی، تراکم بیشتر درزها در رأس تاقدیس سبب توسعه‌یافتگی و نفوذ بیشتر آب در این بخش می‌شود.

در میان متغیرهای اقلیمی، بارش سومین عامل مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست است. به منظور مکان‌یابی بیشینه و کمینه بارش منطقه، با استفاده از مدل درون‌یابی IDW بیشترین بارش در بخش جنوب خاوری حوضه و کمترین آن در بخش شمال باختری تعیین شد. به منظور تعیین گرادیان بارش از آمار ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه استفاده شده که ضریب همبستگی آن برابر ۰/۷ است. این ضریب همبستگی معنی‌دار است و می‌توان با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان شیب تغییرات بارش را در حوضه مورد مطالعه پیش‌بینی کرد. شکل ۶ این رابطه را به صورت ترسیمی و معادله خط رگرسیون نشان می‌دهد. ضریب تعیین شده در این نمودار بر وجود رابطه میان بارش و ارتفاع دلالت دارد و با تصریح بر امکان پیش‌بینی روند بارش در بلندی‌ها، بیان می‌دارد که ۷۶ درصد از تغییرات بارش در منطقه قابل استناد به تغییرات ارتفاع و ۲۴درصد بقیه، از عوامل دیگر ناشی می‌شوند (شکل۷). با مقایسه نقشه پهنه‌بندی بارش و نقشه‌های پایانی به دست آمده از مدل فازی و AHP، نواحی توسعه‌یافته کارست که بیشترین نفوذپذیری را دارند، در هسته بیشینه بارش قرار گرفته‌اند. البته به دلیل آن که تعداد ایستگاه‌ها در منطقه کم بود و تعمیم داده‌های دما به کل منطقه نتایج واقعی به دست نمی‌داد، از عامل دما چشم‌پوشی شد و تنها عامل بارش مورد بررسی قرار گرفت.

پهنه‌بندی بارش محدوده با اعمال اثر توپوگرافی با محاسبه ضریب همبستگی میان میزان بارش ایستگاه‌ها و سطوح ارتفاعی و معنادار بودن رابطه آنها با معادله خط رگرسیون (y=0.208x+572.71) به دست آمد. شکل ۸ نقشه هم‌باران منطقه را نشان می‌دهد که بیشینه بارش در ارتفاعات و قلل کوه‌ها از دامنه‌ها و نقاط پست متمایز شده است.

با افزایش ارتفاع به عنوان عامل چهارم، میزان دما کاهش و میزان بارش افزایش می‌یابد. از این‌رو نقش زیادی در توسعه‌یافتگی فرایند کارست دارد. بیشترین تحول‌یافتگی کارست نیز در سطوح ارتفاعی بالای ۱۸۰۰ متر دیده می‌شود. این طبقه، بخش‌های شمال باختری، باختر و جنوب باختری را در بر می‌گیرد (شکل ۹). بارش زیادتر و بیشتر به صورت برف با ماندگاری بیشتر آن در این سطوح همراه است.

با توجه به مبانی نظری، شیب‌های کم و مناطق مسطح بیشترین پتانسیل را در کارستی شدن دارند. در طبقه‌بندی ارائه شده برای منطقه، شیب‌های ۰ تا ۲۰ درجه، بیشترین امتیاز را دارا بوده که در بخش‌های شمال باختری، باختر، جنوب باختری و به صورت پراکنده در مرکز حوضه وجود دارد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود رنگ خاکستری روشن در هر دو مدل شیب‌های مناسب در فرایند کارستی شدن را نشان می‌دهند و باهم انطباق دارند.

با توجه به نقشه پایانی، بهترین جهت‌ها به منظور توسعه‌یافتگی کارست، جهت‌ها پشت به آفتاب (نسار) بوده و جهت‌ها خاوری، باختری و دامنه‌های رو به جنوب به ترتیب کمترین تأثیر را در این فرایند دارند (شکل ۱۱). این مسئله با بحث‌های مبانی نظری مطرح شده که دامنه‌های رو به شمال و دامنه‌های خاوری به علت تبخیر کمتر و ماندگاری بیشتر برف زمینه مساعدتری برای توسعه کارست دارند، به طور کامل همخوانی دارد و نقشه‌های به دست آمده نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

منطقه مورد مطالعه از نظر نوع زمین‌ها به ۳ واحد کوهستان، تپه‌ماهور و دشت تقسیم می‌شود. به علت رخنمون سازند آهک آسماری، عامل زمین‌ساخت و همچنین ارتفاع زیاد که باعث افزایش تأثیر متغیرهای اقلیمی می‌شود، می‌توان بیشترین توسعه‌یافتگی را در نوع کوهستان واقع در محدوده‌های شمالی، خاوری و جنوب خاوری و باختری دید (شکل ۱۱).

ارزش‌گذاری کاربری زمین با توجه به ۹ طبقه صورت گرفت. منطبق با نقشه پایانی به‌دست آمده بیشترین گسترش توسعه‌یافتگی در مراتع و جنگل‌های متراکم است (شکل ۱۳).

هر چه تراکم آبراهه و دره رودخانه در ناهمواری‌های آهکی کمتر باشد، تحول کارست بیشتر است (وزارت نیرو، تماب، ۱۳۷۳). میزان حریم و ارزشی که برای این عامل در مدل AHP در نظر گرفته شد، فاصله تا ۱۵۰، ۱۵۰ تا ۳۰۰ و تا بیش از ۳۰۰ متر بود که حریم ۱۵۰ متر و کمتر، بیشترین اهمیت را در این فرایند دارند (شکل ۱۴).

۵– نتیجه‌گیری

بر پایه نتایج حاصل از متغیرهای مؤثر در تحول و توسعه‌یافتگی کارست، منطقه مورد بررسی به ۴ پهنه کارست کامل (Holokarsr) (توسعه‌یافته)، کارست نارس (Merokarst) (مناطق با توسعه کم)، کارست بینابین (Transitional) (توسعه متوسط عوارض کارستی) و مناطق توسعه‌نیافته کارستی تفکیک می‌شود. در صد و مساحت زیر پوشش هر یک از پهنه‌ها در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و نیز جدول‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود. شرایط و ویژگی‌های این ۴ پهنه به شرح زیر است.

– **مناطق توسعه‌نیافته:** رخنمون سازندهای غیر آهکی کواترنری و فارس، تأثیر کم عامل زمین‌ساخت، جهت‌های شیب جنوبی، جنوب باختری و باختر، بارش و ماندگاری کم آن نسبت به ارتفاعات و پوشش گیاهی کم‌تراکم، اصلی‌ترین عوامل در توسعه‌نیافتگی کارست در این مناطق هستند.

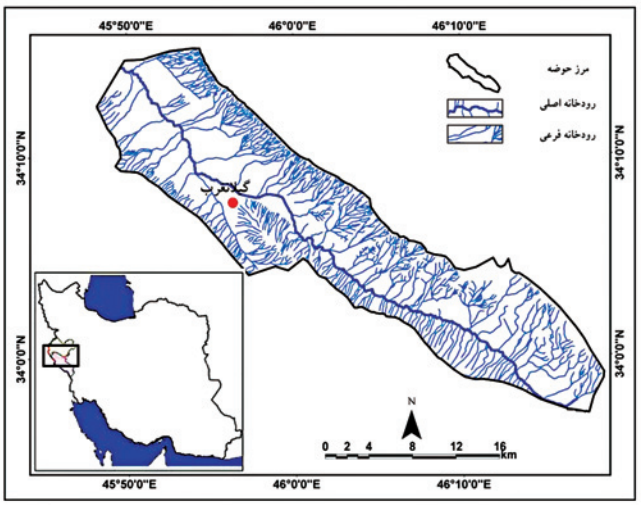
– **مناطق با توسعه‌یافتگی کم:** این مناطق را می‌توان به صورت پراکنده در جنوب باختری و اطراف مناطق توسعه نیافته مشاهده کرد. پراکندگی این مناطق در نقشه AHP تقریبا با همان روند نقشه فازی ولی با گسترش کمتر مشاهده می‌شود که علت آن را می‌توان، رخنمون سازندهای پابده و گورپی و آسماری کم‌ستبرا در نواحی جنوب‌باختری منطقه، دشتی بودن و ارتفاع و میزان بارش کم، جهت شیب جنوبی،

جنوب باختری و باختر، شیب زیاد منطقه، پوشش گیاهی تنک و تأثیر کم‌رنگ عامل زمین‌ساخت دانست.

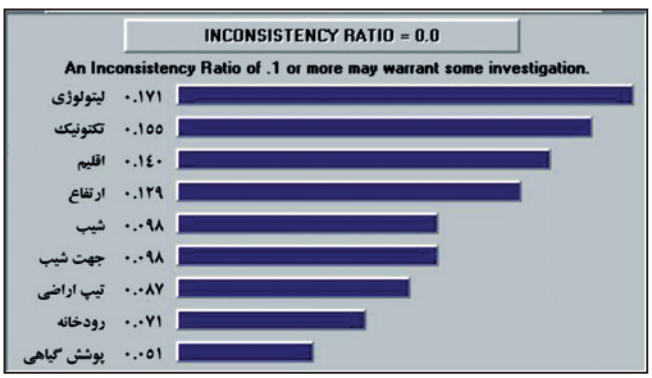
– **مناطق با توسعه‌یافتگی متوسط:** این نواحی را می‌توان در دامنه‌های رو به آفتاب کوهستان شمالی حوضه در هر دو نقشه و به صورت پراکنده در دیگر بخش‌های منطقه به‌ویژه در نواحی جنوبی دشت مشاهده کرد. موارد قابل بیان در ارتباط با این مناطق، رخنمون سازند آهک آسماری، ارتفاع بالا، بارش زیاد و پوشش گیاهی متراکم است. این پهنه در هر دو مدل بیشترین مساحت و درصد را به خود اختصاص داده است.

– **مناطق توسعه‌یافته:** عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست در این مناطق، ترکیب‌سنگی (سازند آسماری)، توسعه کارست در ارتفاعات جنوبی حوضه و زمین‌های مسطح در رأس تاقدیس شمالی و در امتداد گسل اصلی منطقه در سازند آسماری، قرار داشتن در هسته بیشینه بارش، قرار داشتن در جهت‌های شیب شمالی، شمال خاوری و خاوری، پوشش گیاهی متراکم از نوع جنگل و چراگاه، ارتفاع بالا و بارش زیاد و بیشتر به صورت جامد است.

به منظور ارزیابی میزان کارایی روش‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی کارست، لازم است نتایج حاصل با نقشه پراکندگی شکل‌های‌کارست مطابقت داشته باشد. بر پایه تقسیم‌بندی بر مبنای ویژگی‌های ساختمانی و ترکیب‌سنگی، کارست‌های منطقه از نوع بزرگ ناودیسی و کارست کوه‌زایی چین‌خورده و لندفرم‌های کارستی منطقه بیشتر از نوع پالئوکارست هستند. با توجه به شرایط آب و هوایی کنونی و ارتفاع کم منطقه و عرض جغرافیایی پایین، تحول و توسعه کارست در زمان حاضر به صورت بسیار محدود و در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر دیده می‌شود. با توجه به بازدیدهای میدانی انجام شده، لندفرم‌های کارستی متنوعی در منطقه شکل گرفته‌اند.

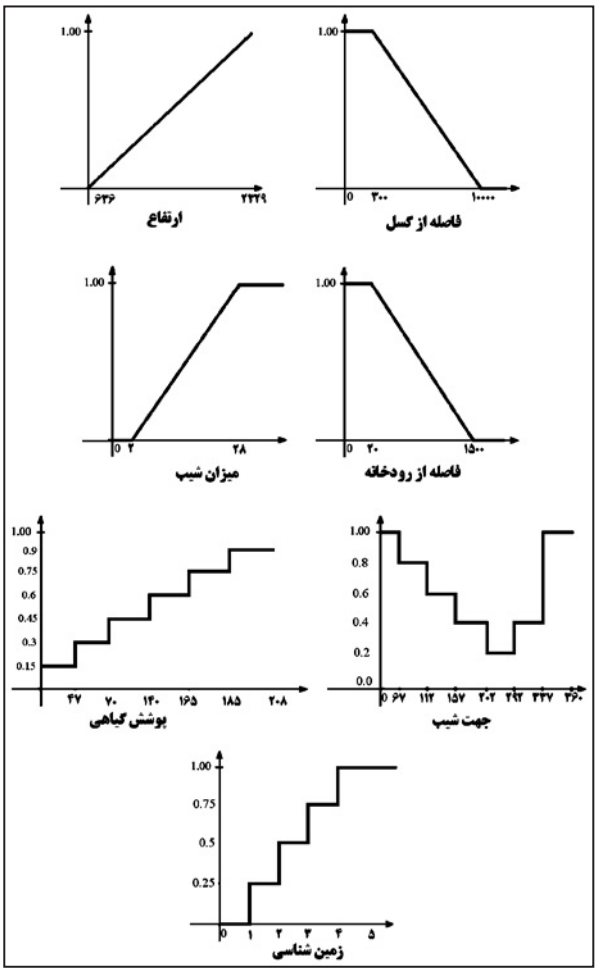


شکل ۱- موقعیت حوضه چله در نقشه ایران.

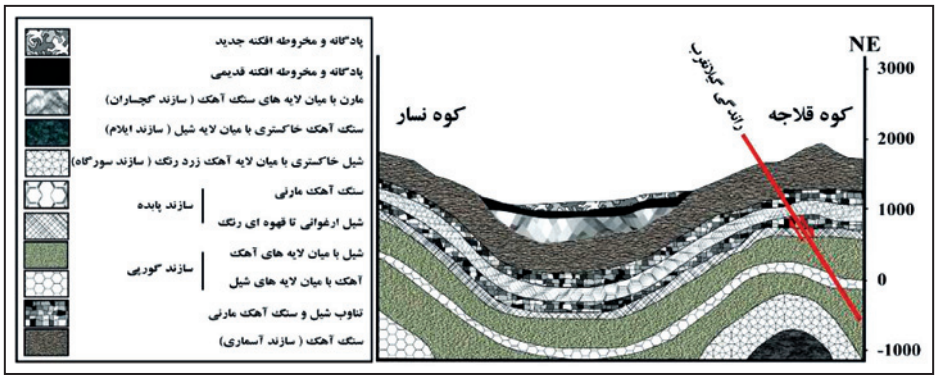


شکل ۲ - ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست.

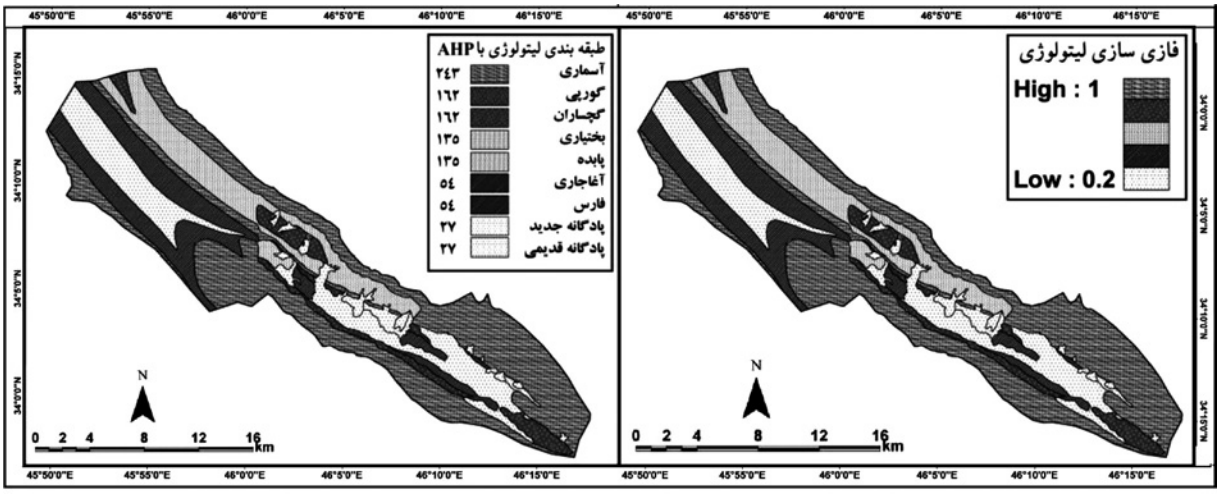
چاله‌های بسته (شکل ۱۵) که در رأس تاقدیس‌ها و ارتفاعات بالای ۱۸۰۰ متری قرار گرفته‌اند به عنوان توسعه‌یافته‌ترین شکل‌های کارستی به‌شمار می‌آیند. گفتنی است که فروچاله‌ها از دید چگونگی تشکیل به دو نوع انحلالی و ریزشی تقسیم می‌شوند (Wiliam & Ford, 2007). فروچاله‌های منطقه از نوع انحلالی هستند. به منظور اعتبارسنجی دو مدل AHP و فازی، نقشه زمین‌ریخت‌شناسی شکل‌های کارست (شکل ۱۷) منطقه با تأکید بر چاله‌های بسته با دو نقشه خروجی به دست آمده از ترکیب ۹ متغیر مؤثر نشان می‌دهد که مدل Fuzzy توانایی بیشتری برای پهنه‌بندی توسعه‌یافتگی کارست نسبت به مدل AHP دارد، به عبارتی، پهنه‌های توسعه‌یافته کارستی با شکل‌های کارستی موجود در منطقه مطابقت و هماهنگی بیشتری نشان می‌دهند. مناطق مساعد در فرایند توسعه‌یافتگی کارست با کمی تفاوت در هر دو مدل قابل مشاهده است. گفتنی است که اختلاف موجود در دو مدل را می‌توان به نوع اطلاعات ورودی مدل فازی به دلیل ویژگی خاص آن با متغیرهایی که روند تغییرات پیوسته دارند مربوط دانست همانند شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از عوارض طبیعی همچون گسل، رودخانه و ... نتایج مطلوب‌تری نسبت به دیگر مدل‌های طبقه‌بندی همانند AHP ارائه می‌دهد. ولی در ارتباط با لایه‌های با پهنه‌های مجزا با ویژگی گسسته مانند نقشه‌های پوشش گیاهی، خاک، زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی تفاوت مشخصی میان مدل فازی و AHP دیده نمی‌شود. نتایج حاصل از تطبیق ۹ لایه متغیرهای مستقل با نقشه زمین‌ریخت‌شناسی کارست منطقه به عنوان متغیر وابسته در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ دیده می‌شود که پهنه‌بندی پایانی متغیرهای مورد استفاده را با کمک هر دو مدل AHP و فازی نشان می‌دهد.



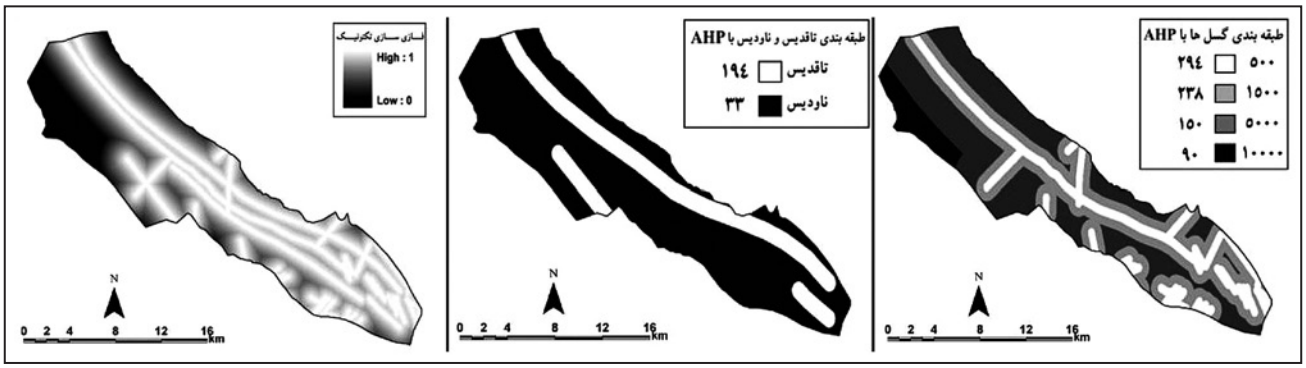
شکل ۳- الگوی توابع فازی هر یک از معیارهای مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست.



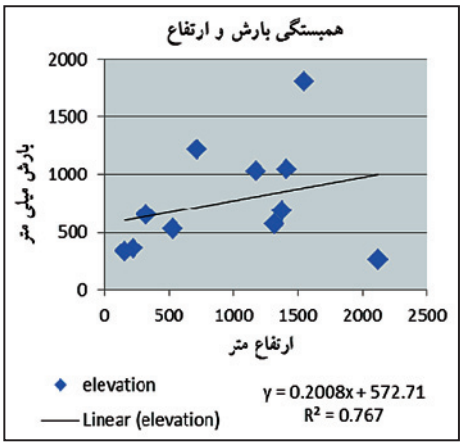
شکل ۴- تناوب لایه‌های رسوبی در نیمرخ عرضی منطقه مورد مطالعه.



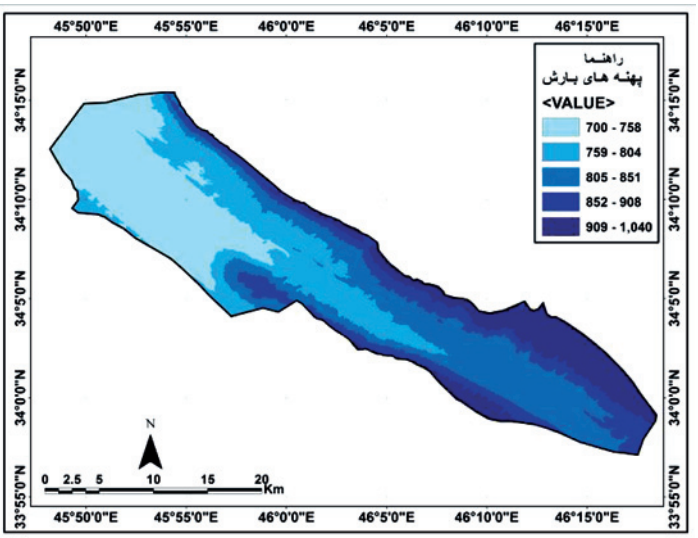
شکل ۵- پهنه‌بندی عامل ترکیب‌سنگی با استفاده از دو مدل فازی و AHP.



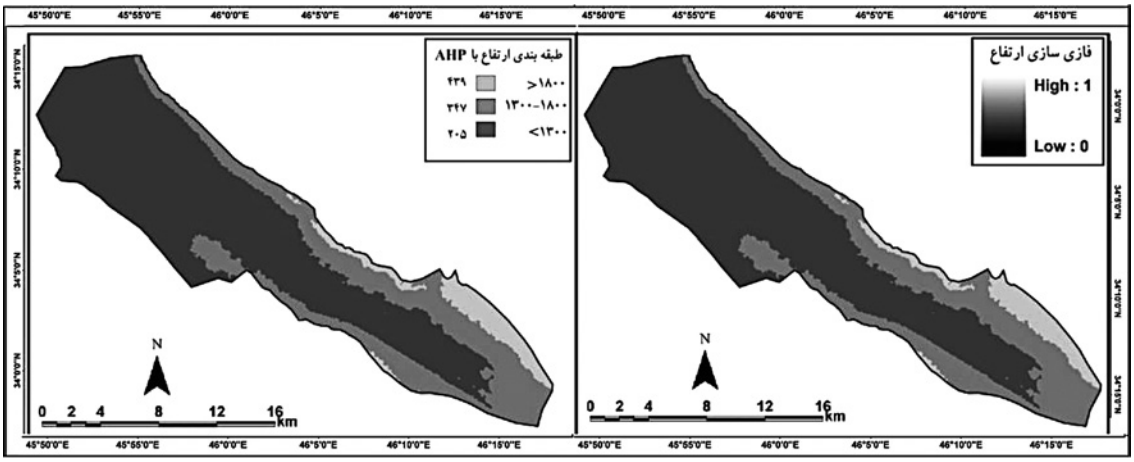
شکل ۶- پهنه‌بندی عامل زمین‌ساخت (گسل‌ها و محور تاقدیس و ناودیس‌ها) با استفاده از دو مدل فازی و AHP.



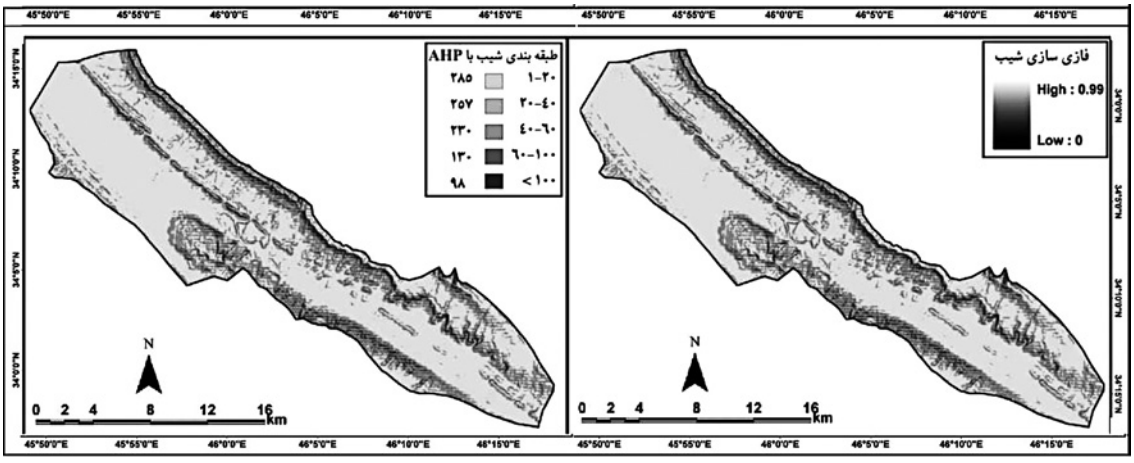
شکل ۷- گرادیان بارش در منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های موجود.



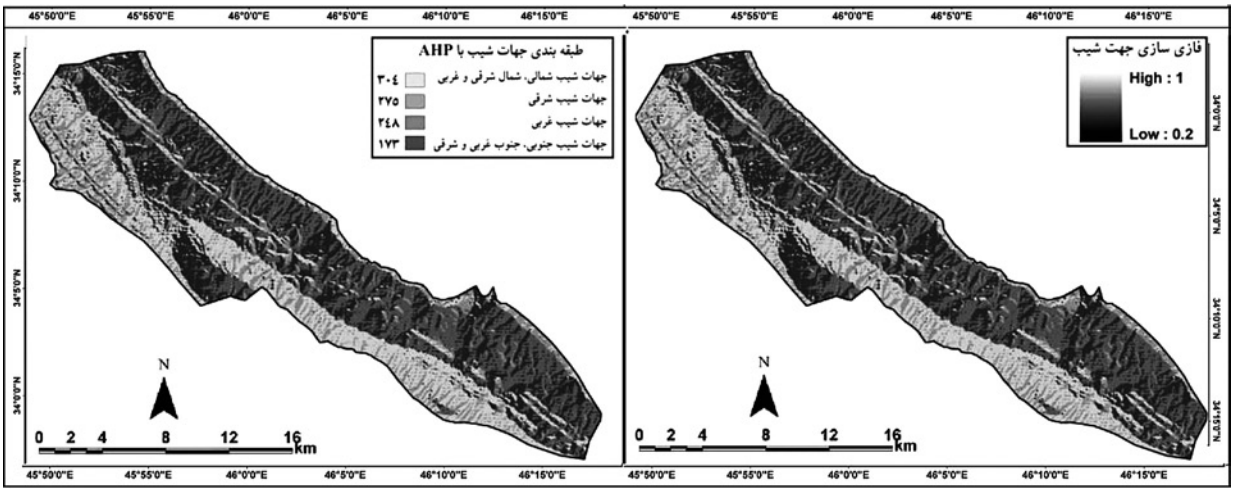
شکل ۸- پهنه‌بندی بارش در منطقه مورد مطالعه.



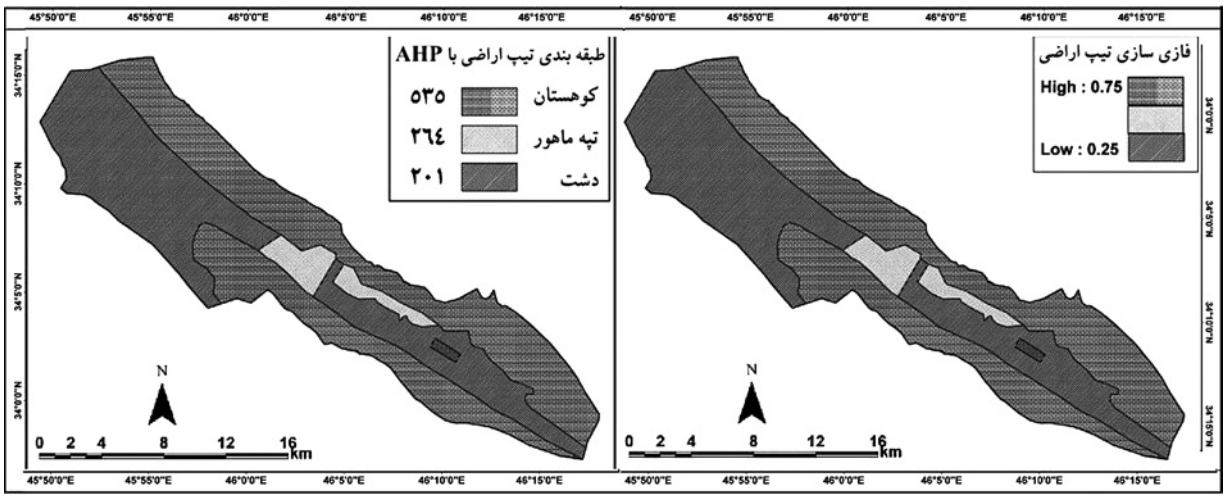
شکل ۹- پهنه‌بندی ارتفاع با استفاده از دو مدل فازی و AHP.



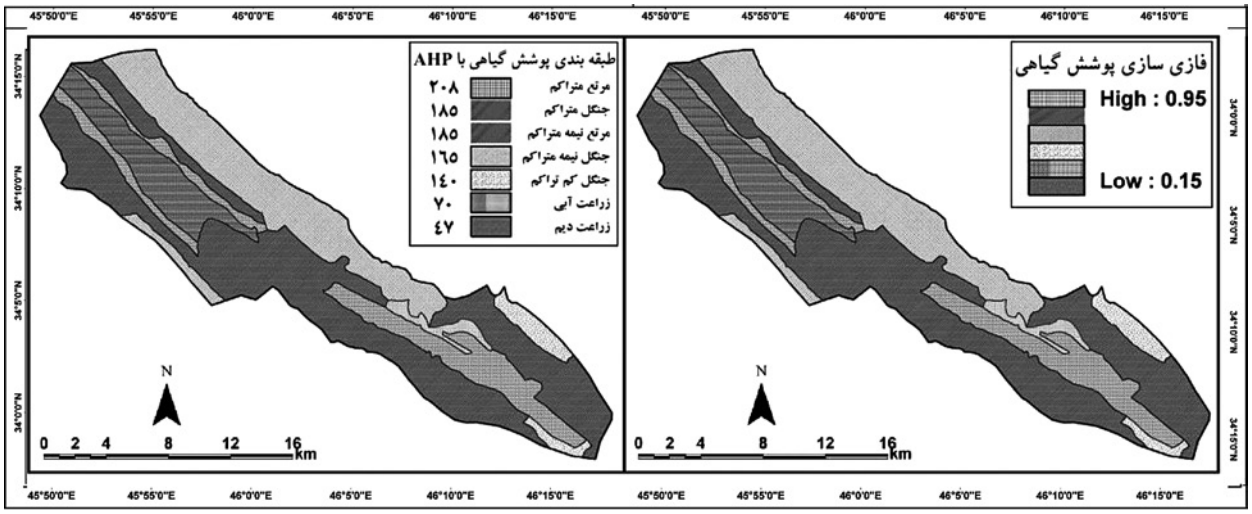
شکل ۱۰- پهنه‌بندی شیب با استفاده از دو مدل فازی و AHP.



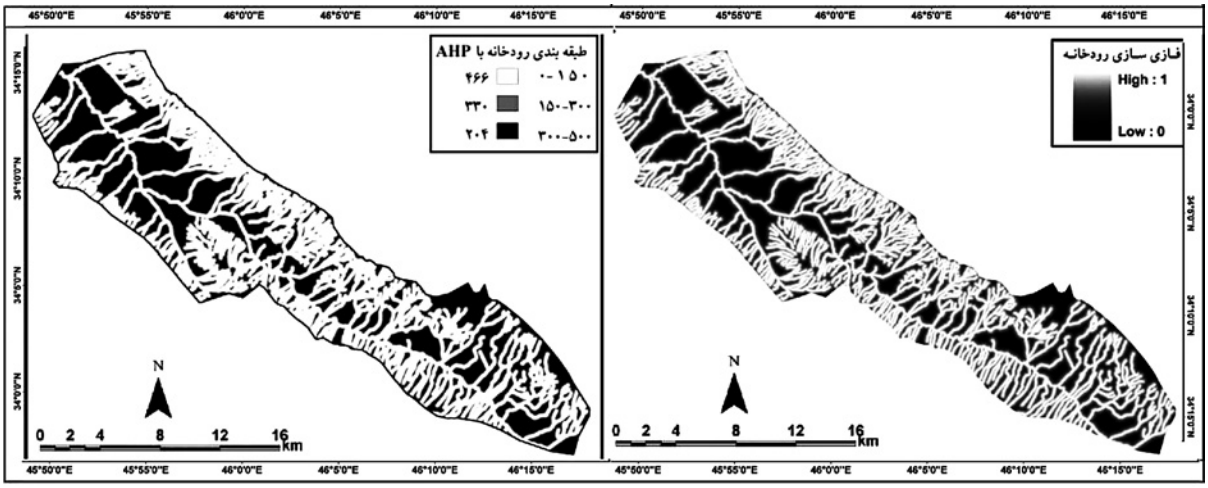
شکل ۱۱- پهنه‌بندی جهت شیب با استفاده از دو مدل فازی و AHP.



شکل ۱۲- پهنه‌بندی نوع زمین‌ها با استفاده از دو مدل فازی و AHP.

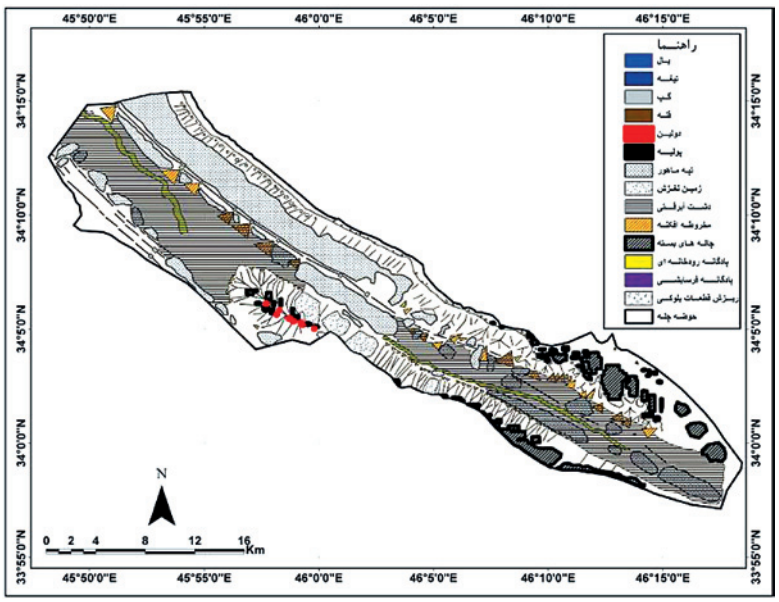


شکل ۱۳- پهنه‌بندی پوشش گیاهی با استفاده از دو مدل فازی و AHP.

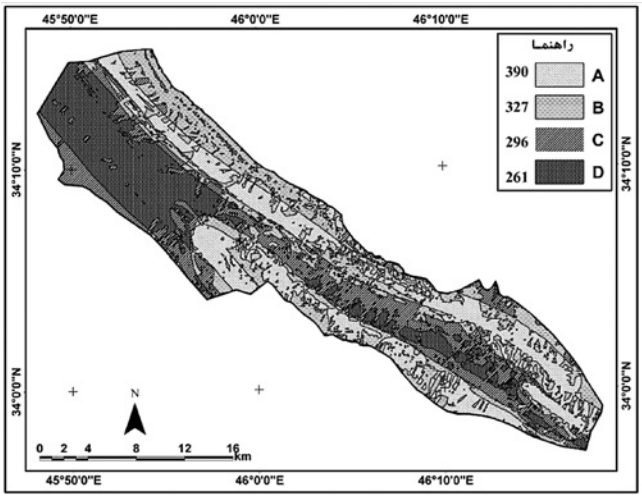


شکل ۱۴- پهنه‌بندی رودخانه‌ها با استفاده از دو مدل فازی و AHP.

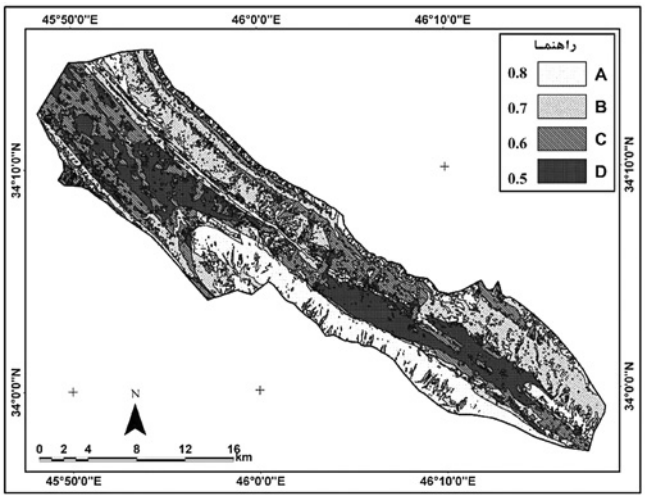
شکل ۱۵- سطوح هموار کارستی در محدوده مورد مطالعه.



شکل ۱۶- زمین‌ریخت‌شناسی حوضه مورد مطالعه.



شکل ۱۷- پهنه‌بندی توسعه کارست با استفاده از مدل AHP (A: مناطق توسعه‌یافته، B: مناطق با توسعه متوسط، C: مناطق با توسعه کم، D: مناطق توسعه‌نیافته).



شکل ۱۸- پهنه‌بندی توسعه کارست با استفاده از مدل فازی (A: مناطق توسعه یافته، B: مناطق با توسعه متوسط، C: مناطق با توسعه کم، D: مناطق توسعه‌نیافته).

جدول ۱- مساحت و درصد سازندهای زمین‌شناسی تشکیل‌دهنده حوضه مورد مطالعه.

ردیف	سازند	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
۱	آسماری	۲۰۹/۱	۴۳/۳
۲	فارس	۶۷/۱	۱۳/۹
۳	پابده	۶۲/۵	۱۲/۹
۴	پادگانه‌های (تراس‌های) آبرفتی	۵۲/۶	۱۰/۹
۵	پادگانه‌های برفتی جوان	۳۹/۷	۸/۲
۶	گچساران	۲۰/۹	۴/۳
۷	آغاجاری	۱۱/۵	۲/۳
۸	گورپی	۱۰/۹	۲/۲
۹	نهشته‌های مخروطه‌افکنه‌ای کهن و تازه	۴/۸	۱
۱۰	بختیاری	۴	۰/۸
	جمع	۴۸۳/۵	۱۰۰

جدول ۲- نتایج نمونه‌گیری از درز و شکاف‌ها در حوضه مورد مطالعه.

ردیف	ستبرای متوسط (سانتی‌متر)	طول درزه‌ها (متر بر متر مربع)	مساحت درزه‌ها به درصد	طبقه ارتفاعی
۱	۴	۱/۴۰	۱۶/۶	۱۰۰۰-۱۳۰۰
۲	۷	۱/۶۳	۳۰	۱۳۰۰-۱۸۰۰
۳	۹	۱/۷۶	۴۵	۱۸۰۰<

جدول ۳- مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش AHP.

ردیف	طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
۱	توسعه‌یافته	۱۲۷/۶۲	۲۶/۶
۲	توسعه متوسط	۱۴۰/۴۲	۲۹/۲
۳	توسعه کم	۱۰۳/۷۲	۲۱/۶
۴	توسعه‌نیافته	۱۰۸/۳۸	۲۲/۶
	جمع	۴۸۳/۵	۱۰۰

جدول ۴ - مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش منطق فازی.

ردیف	طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
۱	توسعه‌یافته	۱۰۷/۹۵	۲۲/۵
۲	توسعه متوسط	۱۶۵/۲۴	۳۴/۱
۳	توسعه کم	۱۲۱/۶	۲۵/۲
۴	توسعه‌نیافته	۸۷/۷۰	۱۸/۲
جمع		۴۸۳/۵	۱۰۰

کتابنگاری

رضائی، م. ت. و زمانی، ا.، ۱۳۷۷- ارتباط سیستم ساختمانی و کارست‌شدگی، مجموعه مقالات دومین سمپوزیوم بین‌المللی منابع آب کارست در ایران، تهران،

سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح عکس‌های هوایی در مقیاس تقریبی ۱:۵۵۰۰۰ سال ۱۳۵۵.

سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۵- نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ برگ‌های کال‌کش، ایوان‌غرب، گواور.

سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۲۰۰۲- تصویر ماهواره‌ای IRS قطعه تحت پوشش منطقه زاگرس باختری.

سازمان زمین‌شناسی کشور ، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برگ‌های کرند و ایلام.

سازمان هواشناسی کشور، داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک اسلام‌آباد غرب، سال‌های ۱۹۸۷- ۲۰۰۵ میلادی.

عشقی، ا. و ثروتی ، م. ر.، ۱۳۸۳- ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مناظر کارستی در حوضه آبریز کارده (شرق زون کپه‌داغ)، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۸، ص ۱۵- ۱.

قصی‌اویلی، ج.، ۱۳۷۶- مطالعه لیتواستراتیگرافی و بررسی کارستی شدن رخنمون‌های کربناته منطقه نوا- قلاجه در باختر استان کرمانشاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

کاظمی، ر.، غیومیان، ج. و جلالی، ن.، ۱۳۸۵- بررسی نقش عوامل ساختاری در فراوانی منابع آب در منطقه کارستی لار با استفاده از سنجش از دور و GIS، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۳.

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، ص ۶۰- ۴۱.

ملکی، ا.، اویسی، م. و غلامی‌راد، ز.، ۱۳۸۶- بررسی تأثیر تکتونیک بر تحول چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه با استفاده از روش رادار GPR، مجموعه مقالات کنفرانس بررسی منابع آب استان کرمانشاه، انتشارات چشمه هنر و دانش، ص ۷۶- ۶۱.

ملکی، ا. و محمودی، ف.، ۱۳۸۰- تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون – پرآو (کرمانشاه)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۰، ص ۹۳- ۱۰۶.

وحدتی، س. م. و طاهری، ک.، ۱۳۸۶- دسته‌بندی ساختاری چشمه‌های کارستی حوضه الوند (جنوب غرب استان کرمانشاه)، کنفرانس بررسی منابع آب استان کرمانشاه، ص ۹۹-۸۷.

وزارت نیرو (تماب)، ۱۳۷۳- فرهنگ چندزبانه واژه‌های کارست، سازمان تحقیقات منابع آب.

References

Al-Mohseen, K. A. A., 2009- "Drought index assessment for Fatha region using fuzzy logic approach", Proceedings of the Georgia Water Resources Conference, held 23-27 2009, at the University of Georgia. Athens, Georgia.

Ford, D. C. & Williams, S., 1989- Karst geomorphology and hydrology. 6.1pp.

Lotfi Zadeh, A., 1965- "Fuzzy sets." Information and Control, Vol. 8; 338-353.

Lotfi Zadeh, A., 1975- Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes, ed. L. Zadeh, K. S. Fu, K. Tanaka, & M. Shimura (London: Academic) WGA, 1996.

Mahonen, P. & Frantti, T., 2000- Fuzzy Classifier for Star-Galaxy Separation', the American Astronomical Society, 541:261È263.

Mull, D. S., Neilsen, D. M. & Quinlan, J. F., 1988 - Application of dye – tracing techniques for determine solute transport characteristics of Groundwater in karst terrains.

Parizek, R., 1990- Nature and hydrologic significance of fracture terraces lineaments, and fracture zones related to ground water monitoring. U.S.E.P.A. Office of Research and Development Environment, Environmental Monitoring Systems, Technical document CR813660-01-0, 165 pp.

Parizek, R. R., 1976- on the nature and significance of fracture trace and lineaments in carbonates and other terrains: In karst Hydrology and water resources, Proceedings of the U.S. Yugoslavian Symposium.

White, W. B., 1988-Geomorphology and Hydrology of karst، oxford university press. Quinlan, j, 1989،Groundwater monitoring in karst terrains, EPA. 600/ x.

William, P. & Ford, D., 2007- Karst hydrogeology and geomorphology, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 1-578.

The Effective Factors on Development and Zoning of Karst in Cheleh Basin Using Fuzzy Logic and AHP Models in Kermanshah Province

M. Yamani [1*], A. A. Shamsipour [2], M. Jafari Aghdam [3] & S. Bagheri Seyed Shokri [4]

[1] Associate Professor, Department of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.
[2] Assistant Professor, Department of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.
[3] M.Sc. Student, Department of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.
[4] Ph.D. Student, Department of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.

Received: 2011 January 31 Accepted: 2011 October 08

Abstract

The Cheleh basin is located in the south of Kermanshah province and the Zagros morphotectonic zone. According to the vast of limestone formation, and the presence of tectonic faults, developed karst land forms has evolved. The purpose of this study is to survey the development of karst and the effect of permeable factors on it. Main data of the research are formed by topographic and geologic maps and aerial photos along with hydrology stats of Department Energy. In this study are nine environmental factors as independent variables and Geomorphological karstic landforms as the dependent variable were examined. At first was identified quantitative and qualitative criteria and then doing field works, interviews and questionnaires, these criteria and factors are analyzed using Analytical Hierarchy Process and finally were gained in GIS, maps and unificating and Final correction with the help of fuzzy logic, respectively. In order to better conclusions, the region in terms of development in karst was divided into four sections. Combining data layers approve the effective role of lithology (Asmari Formation) in the process of development in karsting. Also has seen development in karst on the southern highlands of basin and flat lands at the head of the northern anticline and along the main fault of the region. karst areas Developed 107.95 square kilometers about 22.5 percent and regions with average development of karst covers 34 percent of the watershed basin.

Keywords: Karst, AHP model, Fuzzy logic, Cheleh basin, Erosion.

For Persian Version see pages 57 to 66

*Corresponding author: M. Yamani; E-mail: myamani@ut.ac.ir