جغرافیا و روابط انسانی، بهار ۱۳۹۹، دوره۲، شماره٤

پهنه بندی توسعه کارست به منظور شناسایی منابع آب‌های کارستی با استفاده از مدل منطق فازی و AHP (حوضه آبریز تکاب)

۱–عادل رسولی* ۲– زهرا باباخانی ۳–سعید گلشنی زاد تکان تپه ٤–کامیار امامی

۱–کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه تهران

۲– کارشناسی ارشد منابع آب،گروه علوم ومهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۳– کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه تهران

٤– کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت:۱۳۹۹/۰۱/۱٦ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲٤

چکیده

با توجه به نقش و اهمیتی که منابع آب کارستیک در تامین منابع آبی و مکان‌گزینی سکونتگاه‌ها دارند، یکی از کارهایی که در مناطق کارستی صورت می‌گیرد پهنه‌بندی و تأثیر عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی مناطق کارستی است. بر این اساس در تحقیق حاضر به پهنه‌بندی کارست پرداخته شده است و هدف شناسایی مناطق مستعد توسعه کارست که نتیجه آن شناسایی منابع آب‌های زیرزمینی و چشمه‌های کارستی می‌باشد. برای این پهنه‌بندی از۸ پارامتر زمین‌شناسی، بارش، رودخانه، گسل، شیب، جهت شیب،دامنه ارتفاعی و دما استفاده شده است. با توجه به این هدف در این تحقیق از دو روش گامای فازی و AHP جهت پهنه‌بندی کارست در حوضه‌ی مورد مطالعه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نهایت با مقایسه کردن این دو روش از نظر بیشترین صحت و درستی نقشه با بازدیدهای میدانی، که نقشه نهایی حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP) بیشترین تطابق را با واقعیت در منطقه دارد. به طوری که طبقه بسیار توسعه‌یافته، توسعه‌یافته و متوسط بیش از نیمی از مساحت حوضه را در برگرفته و از لحاظ جغرافیایی در جنوب و مرکز حوضه قرار گرفته‌اند که دهستان‌های چوپلو، قوجه و دورباش و منطقه تخت سلیمان و شهر تکاب را شامل می‌شود.

واژگان کلیدی: کارست، حوضه تکاب، منابع آب و مدل AHP

مقدمه

سرزمین ایران به دلیل وجود نهشته‌های کربناته در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی از پهنه‌های کارستی شایان توجهی برخوردار است؛ به طوری که در ایران علاوه بر غارها، توسعه‌یافته‌ترین اشکال کارستی یعنی پولیه‌ها و اشکال مینیاتوری کارستی در حوضه‌ها (مانند لاپیه‌ها) نیز مشهود است (وزارت نیرو، ۱۳۷۳). آب داخل درز و شکاف سنگ‌های قابل انحلال مثل کربنات کلسیم نفوذ نموده و موجب توسعه درز و شکاف‌ها شده و سازند کارستی را پدید می‌آورد (مول[1] ۱۹۸۸). این مخازن آب هم از نظر کمّی و هم از بعد کیفی عموماً مطلوب‌اند و به مصرف شرب می‌رسند. دیگر اهمیت این پهنه‌ها در اشکال متنوعی است که در مناطق کارستیک تشکیل می‌شوند و توسعه می‌یابند. این موضوع برای سرزمینی مانند ایران که از یک سو به دلیل شرایط اقلیمی از منابع آب کافی برخوردار نیست و از سوی دیگر حدود ۱۱ درصد مساحت آن را سنگ‌های کربناته می‌پوشاند اهمیت دارد (افراسیابیان، ۱۳۷۳: ۱۸). به طور کلی عوامل و فرایندهای مختلفی تکامل کارست را تحت تأثیر قرار می‌دهند توپوگرافی، لیتولوژی و ویژگی‌های زمین‌ساختی به عنوان عوامل منفعل عمل می‌کنند و فرایندهای دیگری مانند زمین‌ساخت فعال، فرایندهای هیدرولوژیکی (وابسته به اقلیم)، انحلال زیستی (وابسته به محیط زیست) و فرایندهای ژئومورفولوژی (هوازدگی، شیب، آبراهه‌ها، یخبندان) به طور فعال در توسعه اشکال کارست نقش دارند (کالیک[2] ۲۰۱۱). منابع آبی آبخوان‌های کارستی اهمیت روز افزونی در سراسر جهان دارند و تقریباً ۲۵ درصد از جمعیت جهان به‌ویژه در آسیا، مدیترانه و ایالات‌متحده آب مورد نیاز خود را از آبخوان‌های کارستی تأمین می‌کنند (ون‌براهانا[3] ۲۰۱۱). با توجه به توسعه‌ی شهرها و مجتمع‌های صنعتی به طرف پهنه‌های کارست سطحی و مدفون شده یا پالئوکارست‌ها مسائل ویژه‌ای از جمله مخاطرات محیطی در این قلمروها به وجود آمده است که ضرورت شناخت فرآیندهای کارستی و اشکال ناهمواری آن‌ها را برای برنامه‌ریزان و مدیران سرزمین بیش از گذشته ضروری می‌سازد. بر این اساس هدف اصلی این تحقیق بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست و پهنه‌بندی این توسعه‌یافتگی در حوضه تکاب (ساروق) می‌باشد. طبق مطالعات صورت گرفته تاکنون در زمینه‌ی پهنه‌بندی کارست و مطالعات کارستیک در ایران و جهان تحقیقات متعددی صورت گرفته است؛ اما به طور خاص در مورد منطقه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، مطالعات اندکی صورت گرفته است، از جمله این مطالعات، تحقیق کارن‌ها متنوع‌ترین پدیده‌های کارست در منطقه تخت سلیمان می‌باشد که توسط رضائی‌مقدم و قدری (۱۳۸٤)، انجام گرفته است؛ آن‌ها در مطالعه خود به این نتیجه رسیده‌اند که عواملی مانند گسل‌ها، بارش و رطوبت نسبی در پیدایش و توسعه کارن‌ها مؤثر هستند. ناصری و نیک قوچ (۱۳۹۱)، در تحقیقی تحت عنوان نقش کارست ژیپسی در انتقال آلاینده‌ها از سد باطله معدنی آق دره – تکاب، به این نتیجه رسیده‌اند که مجراهای توسعه‌یافته در ژیپس پی و مخزن سد موجب ارتباط هیدرولیکی بین بخش جنوب غربی مخزن سد باطله و چشمه‌های کارستی پایین‌دست شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در این رابطه کار تحقیقی دیگری انجام نشده یا در صورت وجود در دسترس نگارندگان قرار نگرفته است. بنابراین از جمله کارهایی که در زمینه‌ی پهنه‌بندی کارست در دیگر مناطق انجام شده است شامل تحقیق مقصودی و همکاران (۱۳۸۸)، می‌باشد که در مقاله‌ای با عنوان توسعه کارست در توده‌ی پرآو – بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، به این نتیجه رسیده‌اند که تغذیه مجرایی و کانالیزه چشمه‌های اطراف توده پرآو– بیستون دلالت بر توسعه‌یافتگی کارست در منطقه نسبت به دیگر چشمه‌ها مانند سراب نیلوفر می‌باشد. ملکی و همکاران (۱۳۸۸)، در مطالعه‌ای در زمینه‌ی پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه به این نتیجه دست یافته‌اند که در بین عوامل ارزش‌گذاری لایه‌ها روش ارزش اطلاعاتی بیشترین انطباق را با شاخص انتخاب شده (چاله‌های بسته) در منطقه مورد مطالعه داشته است. علایی‌طالقانی و رحیم‌زاده (۱۳۸۹)، در تحقیقی با عنوان تحول کارست در منطقه‌ی زاگرس، به این نتیجه دست یافته‌اند که حدود ٦۹۲۲۸ کیلومترمربع از مساحت زاگرس از کارست کامل، حدود ٤۱۰۲ کیلومترمربع کارست نارس و حدود ۳۱۲۰۷ کیلومترمربع نیز کارست بینابین پوشیده

---

1 *mull et el*

2 *Gdic*

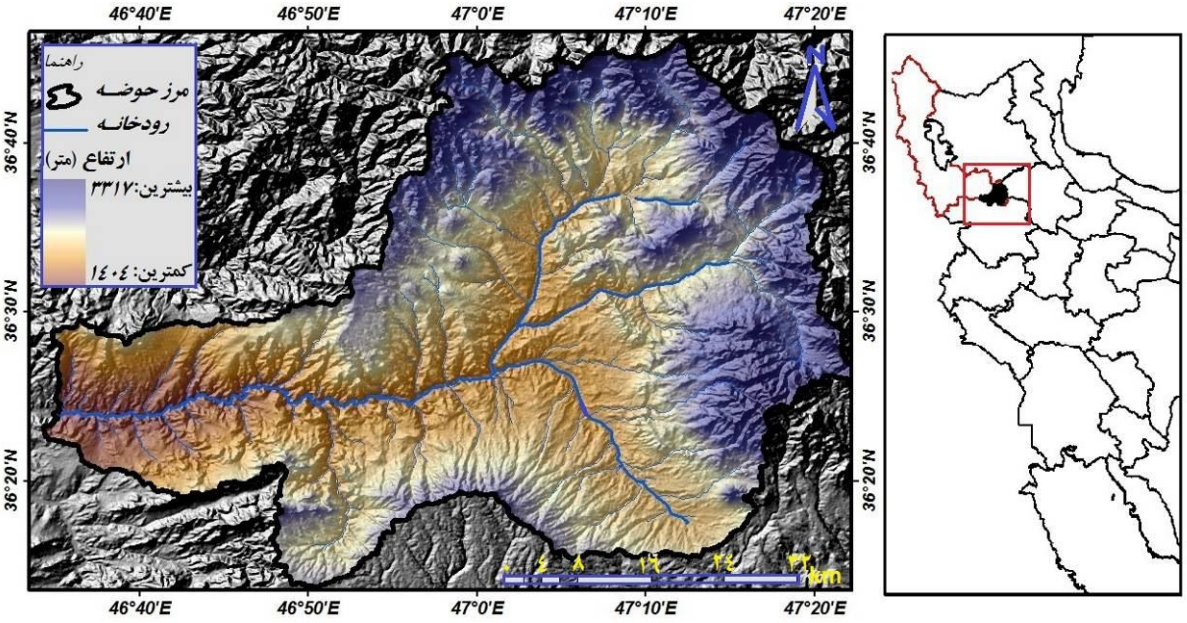
3 *Van brahana*

شده است. جعفربیگلو و همکاران (۱۳۹۰)، در مقاله‌ای با عنوان استفاده از مدل ارتفاعی رقومی در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله-های کارستی توده پرآو بیستون، نشان داده‌اند که در توده پرآو- بیستون اشکال اگزوکارست در فرم‌ها و ابعاد مختلف توسعه‌یافته و تیپیک‌ترین این اشکال یعنی فروچاله‌ها در امتداد درزه‌ها و گسل‌های کششی ناحیه قرار گرفته و فروچاله‌های مستخرج از مدل رقومی ارتفاعی (DEM 30 m) نیز نشان دهنده چنین امتداد و روندی است. در همین راستا یمانی و همکاران (۱۳۹۰)، عوامل توسعه یافتگی کارست را در حوضه‌ی چله در جنوب استان کرمانشاه مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها تأثیر عوامل مختلف از جمله ترکیبات سنگی، آب‌شناسی، کاربری زمین، زمین‌ساخت، ارتفاع، بارش و شیب را در شکل‌گیری پدیده‌های کارستی با هم مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که در بین این عوامل ترکیبات سنگی و عامل زمین‌ساخت به عنوان مهم‌ترین عوامل در توسعه کارست سهیم‌اند. خدری و همکاران (۱۳۹۲)، با استفاده از تلفیق اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور همراه با تحلیل سلسله مراتب زوجی ، پتانسیل توسعه کارست را در تاقدیس پیون مورد ارزیابی قرار داده‌اند؛ نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ۵۹ درصد از تاقدیس پیون در محدوده‌ی با پتانسیل بالای کارست شدگی قرار دارد. همچنین، میرعلایی موردی و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی ژئومورفولوژی اشکال کارستی سنگ‌های کربناته منطقه آهنگران در شمال شرق بیرجند پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که در مناطق با درز و شکاف‌های فراوان، فرایندهای کارستی توسعه بیشتری دارند. در زمینه‌ی کارست از جمله تحقیقاتی که در سطح جهان صورت گرفته است می‌توان به مطالعه‌ای که در زمینه‌ی عوامل کنترل‌کننده‌ی میزان فرسایش کارستی در آلپ اتریش توسط (پلان[1] ۲۰۰۵)، صورت گرفته است اشاره کرد. از دیگر مطالعات، اندازه‌گیری میزان فرسایش کارست با استفاده از کلر- ۳٦ در ساختارهای کلسیتی در لندن توسط اینکپن و همکاران[2](۲۰۱۲)؛ بررسی میزان و شدت فرسایش کارستی توسط گان[3](۲۰۱۳)؛ طبقه‌بندی فروچاله‌های بسته در کارست کربناته به‌وسیله‌ی کرانیک[4](۲۰۱۳)؛ می‌باشد. در کشور ما علیرغم وجود توده‌های کارستی در ارتفاعات زاگرس، البرز و کپه‌داغ و ایران مرکزی متأسفانه تحقیقات بسیار اندکی در مورد شناسایی ناهمواری‌های کارستی، مدیریت بهره‌برداری منابع آب کارست و جاذبه‌های توریستی آن‌ها انجام گرفته است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه: زیر حوضه تکاب (ساروق) یکی از زیرحوضه‌های رودخانه زرینه‌رود می‌باشد (شکل۱)؛ این زیر حوضه جزء واحد ژئومورفیک شمال غرب و زیرواحد آذربایجان فصل مشترک رشته کوه‌های البرز و زاگرس می‌باشد که به‌صورت یک وزنه در محل تلاقی این دو رشته کوه عظیم قرار گرفته است (علایی‌طالقانی،۱۳۹۰). مساحت حوضه ساروق برابر با ۲۳۹۱کیلومترمربع می‌باشد. بیشترین ارتفاع در حوضه مربوط به شرق حوضه با ۳۳۱۷متر که کوه بلقیس هم در این منطقه واقع شده و کمترین ارتفاع نیز در دشت منتهی به خروجی حوضه در غرب منطقه با۱٤۰٤متر واقع شده است. از نمونه‌های تیپیک عوارض کارستی در حوضه مورد مطالعه می‌توان به میراث جهانی تخت سلیمان در شمال غرب حوضه، زندان آهکی سلیمان به عمق ۷۰ متر در فاصله۱۰کیلومتری مجموعه تخت سلیمان، فروچاله نبی‌کندی و برنجه در مرکز حوضه اشاره کرد. ارتفاع جنوبی زیرحوضه منطبق بر خط تقسیم آب دو حوضه آبریز دریاچه ارومیه و حوضه‌ی آبریز دریای خزر (قزل اوزن) است و از نظر موقعیت جغرافیایی در ۳٦ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳٦ درجه و ٤٥ دقیقه عرض شمالی و ٤٦ درجه و ۳۲ دقیقه تا ٤۷ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی واقع شده است و از نظر معادن کانی‌هایی مثل طلا و مس دارای غنی‌ترین و به نوعی منحصربه‌فردترین منطقه در ایران و حتی در خاورمیانه می‌باشد.

---

1 *Plan*
2 *Inkpen et al*
3 *Gunn*
4 *Kranjc*



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه حوضه تکاب (منبع: نگارندگان)

مواد و روش‌ها

در این تحقیق در ابتدا جمع‌آوری اطلاعات به صورت کتابخانه‌ای صورت گرفته است و همچنین توسط بازدیدهای میدانی در چندین مرحله به مشاهده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه پرداخته شده است. ابزارهای مفهومی مورد استفاده در تحقیق شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ برای مشخص کردن خطالرأس‌ها و استخراج حوضه، نقشه‌های زمین‌شناسی۱:۱۰۰۰۰۰ برای تشخیص لیتولوژی و دیجیت کردن گسل‌های حوضه‌ی مورد مطالعه، مدل رقومی ارتفاعی (DEM 30 m) و همچنین مدل‌های مورد استفاده شامل مدل منطق فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در نرم‌افزار Arc GIS به عنوان ابزار غیره مستقیم یا مفهومی به کار گرفته شده است. در این تحقیق روند کلی کار به این صورت است که ابتدا محدوده مطالعاتی تعیین شده است و سپس بر مبنای نظر کارشناسان (۵ متخصص ژئومورفولوژی) پارامترهای مناسب جهت پهنه بندی مناطق مستعد توسعه کارست تعیین شده است که عبارتند از پارامترهای زمین‌شناسی، هم‌بارش، هم‌دما، گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب و آبراهه‌ها که پس از تهیه این لایه‌ها، لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS به منطق فازی تبدیل شده‌اند و در نهایت با استفاده از روش گامای فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP) به ترتیب دو نقشه‌ی پهنه‌بندی شده کارست حوضه‌ی مورد مطالعه در قالب گامای فازی و AHP استخراج شده است. در ادامه به تشریح روش‌های مورد استفاده پرداخته شده است:

روش تحلیل سلسله مراتبی: امروزه در بسیاری تصمیم‌گیری‌ها از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده می‌شود. در این میان تحلیل سلسله مراتبی به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره بیش از سایر روش‌ها در تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفته است که بر پایه سه اصل تجزیه، قضاوت مقایسه‌ای و ترکیب اولویت‌ها می‌باشد (مالچفسکی، ۱۳۹۰، ۳٦٤). مدل تحلیل سلسله مراتبی چه در واقعیت و چه در تئوری، در فرایند حل مشکلات راهبردی به کار گرفته می‌شود (تولگا[1] ۲۰۰٤) و بیش‌تر از این نظر مهم است که زمینه‌ای را برای تحلیل و تبدیل مسائل پیچیده به سلسله مراتبی منطقی و ساده فراهم می‌آورد که برنامه‌ریز بتواند ارزیابی گزینه‌ها را با کمک معیارها و زیر معیارها به‌راحتی انجام دهد، همچنین مکان بررسی سازگاری در قضاوت‌ها را نیز فراهم

[1]. *Tolga*

آورد (زبردست،۱۳۸۰). بر این اساس در تحقیق حاضر به‌منظور به منظور اولویت‌بندی معیارها و تعیین وزن هایی هر کدام از آن‌ها از مدل AHP استفاده شده است.

روش منطق فازی: در منطق کلاسیک درجه عضویت برای همه اجزا در گروه یک قرار دارد و تمام اجزا ارزش مشابهی برای سیستم دارد به‌عبارت‌دیگر در منطق بولین، عضویت یک عنصر در یک مجموعه به‌صورت صفر (عدم عضویت) و یک (عضویت) بیان می‌شود؛ اما در منطق فازی، قطعیت موجود در منطق بولین وجود ندارد و میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می‌شود. عملگر فازی گاما به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = (\mu\, fuzzy\ sum)^{\gamma} + (\mu\, fuzzy\ product)^{1-\gamma}$$

در رابطه بالا، مقدار γ عددی بین صفر تا یک تعیین می‌شود. انتخاب آگاهانه‌ی مقدار γ سبب پدید آمدن مقادیری در خروجی می‌شود که بیانگر سازگاری قابل انعطاف بین گرایشات کاهشی ضرب و افزایشی جمع است (الیشیک و همکاران، ۲۰۰۸ ؛ جیانگ و ایستمن، ۲۰۰۰). این دو روش با ویژگی کارآمدی، هزینه پایین و دقت بالا می‌توانند در تعیین میزان توسعه یافتگی کارست مناطق مختلف قابلیت داشته باشند.

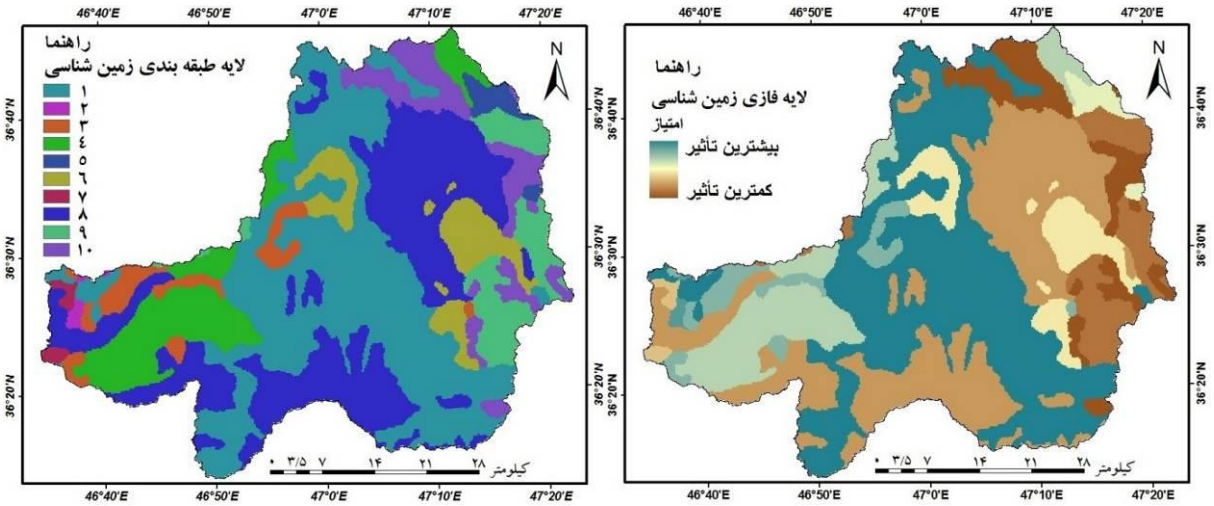
نحوه فازی‌سازی لایه‌های اطلاعاتی: برای ایجاد لایه‌ی فازی زمین‌شناسی ابتدا به هر کدام از جنس‌های زمین‌شناسی بر اساس اینکه تأثیر آن در توسعه کارستی شدن چه قدر است امتیازی بین ۱ تا ۱۰ داده شده است بدین لحاظ که جنس‌هایی که تأثیر بیش‌تری در کارستی شدن دارند امتیاز ۱۰ گرفته است و به جنس‌هایی که تأثیر کمتری دارند امتیاز ۱ اختصاص داده شده است (شکل۲). برای ایجاد لایه‌ی فازی بارش (شکل ۳) ابتدا داده‌های پنج ایستگاه هواشناسی به ترتیب ایستگاه تکاب، زنجان، زرینه، سقز و شاهین‌دژ جمع‌آوری و با داشتن ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح دریا با استفاده از نرم‌افزار اکسل ارتباط بین ایستگاه‌ها و ضریب همبستگی قابل قبول آن‌ها که برابر با ۰/۹۷ به دست آمد با معرفی رابطه‌ی موجود به نرم‌افزارArc GIS در نهایت لایه هم‌بارش منطقه‌ی مورد مطالعه به دست آمده است و برای تبدیل آن به منطق فازی به خطوط هم‌بارش امتیاز داده شده است بدین معنی که بارش ٤٥٠ تا ٥٠٠ میلی‌متر امتیاز ۱۰ و به طبقه بارش ۳۰۰ تا ۳۵۰ امتیاز ۱ داده شده است. برای ایجاد لایه‌ی هم‌دما (شکل٤) نیز مثل لایه‌ی هم بارش عمل شده است؛ به این صورت که با داشتن داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و به دست آوردن رابطه و ضریب همبستگی ایستگاه‌ها و با امتیاز گذاری خطوط هم‌دما از نظر تأثیر در توسعه‌ی کارست با این تئوری که هرقدر دما کمتر باشد توسعه کارست بیشتر است و برعکس دمای زیاد مانع توسعه کارست می‌شود نقشه فازی هم‌دما به دست آمده است. در لایه‌ی فازی گسل، مناطق نزدیک به گسل‌ها بیشترین امتیاز را از لحاظ کارستی شدن دارند (شکل ٥). برای ایجاد لایه‌ی فازی شیب (شکل۷) ابتدا با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر لایه شیب به دست آمده است و سپس به طبقات شیب بر اساس تأثیر آن‌ها در توسعه کارست امتیازدهی شده است، به عنوان مثال به شیب‌های ۰ تا ۱۰ درصد بیش‌ترین امتیاز یعنی ۱۰ و به شیب‌های ۸۰ درصد به بالا کم‌ترین امتیاز یعنی ۱ داده شده است. برای ایجاد لایه‌ی فازی جهت شیب (شکل۸) از ۳۰DEM متر استفاده شده است که به صورت جهات هشتگانه و تخت، طبقه‌بندی شده و به هر کدام از لایه‌ها بر اساس تأثیر آن‌ها در توسعه کارست امتیاز داده شده است.

بحث و نتایج

-پارامترهای موثر در پهنه بندی: در این تحقیق به منظور پهنه بندی مناطق مستعد توسعه کارست، از پارامترهایی استفاده شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

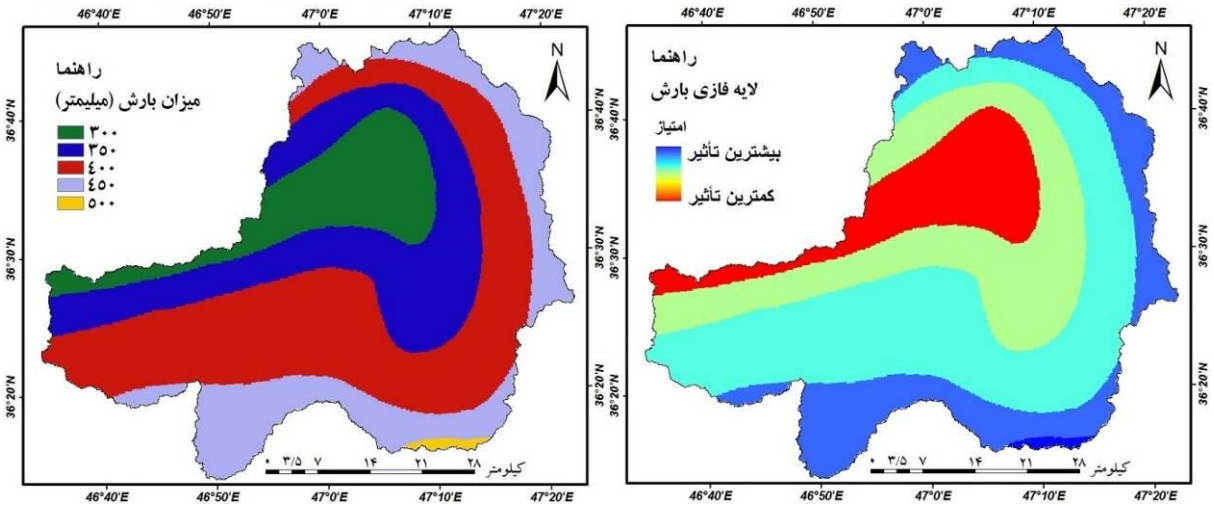
زمین‌شناسی: عوامل زمین‌شناسی به عنوان یکی از موثرترین عوامل در توسعه مناطق کارستیک محسوب می‌شود. سازندهای نفوذپذیر همانند سازندهای آهکی بیش‌ترین پتانسیل را در توسعه مناطق کارستیک دارند، در شکل ۲ نقشه طبقاتی و فازی شده

مناطق کارستیک نشان داده شده است. طبق نقشه‌ی شماره ۲ مناطقی که دارای تأثیر کمتری در کارستی شدن هستند (مناطقی که دارای امتیاز ۱ هستند)، بیشترین وسعت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند و مناطقی که دارای بیشترین تأثیر از لحاظ زمین‌شناسی در کارستی شدن منطقه هستند (مناطقی که دارای امتیاز ۱۰ هستند)، وسعت کمی را دارا می‌باشند.



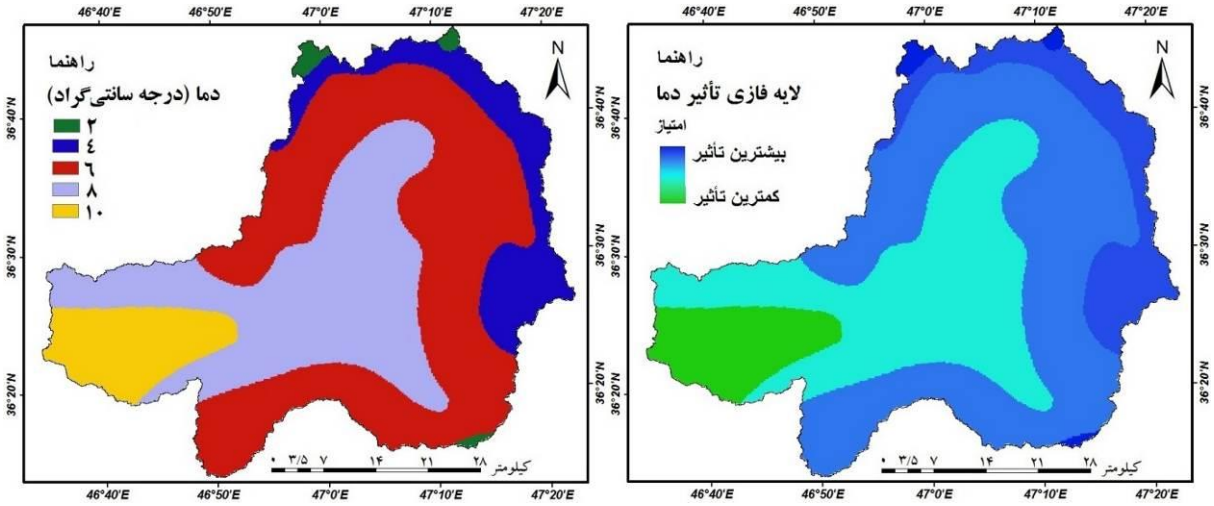
شکل ۲: نقشه‌ی فازی تأثیر زمین‌شناسی بر توسعه‌ی کارست منطقه (منبع: نگارندگان)

بارش: بارش نیز از عوامل مهمی محسوب می‌شود که به طور مستقیم در توسعه مناطق کارستیک نقش دارد. با توجه به اختلاف ارتفاعی که در منطقه وجود دارد، حوضه مورد مطالعه از نظر اقلیمی به چهار منطقه خیلی مرطوب، مرطوب، نیمه مرطوب و نیمه‌خشک تقسیم شده است که وجود بارش زیاد به خصوص برف در منطقه‌ی بسیار مرطوب سبب شده میزان تأثیرگذاری اقلیم در توسعه کارست، در این منطقه بیشتر از سایر قسمت‌ها باشد. در شکل ۳ نقشه طبقاتی و فازی شده بارش حوضه نشان داده شده است.



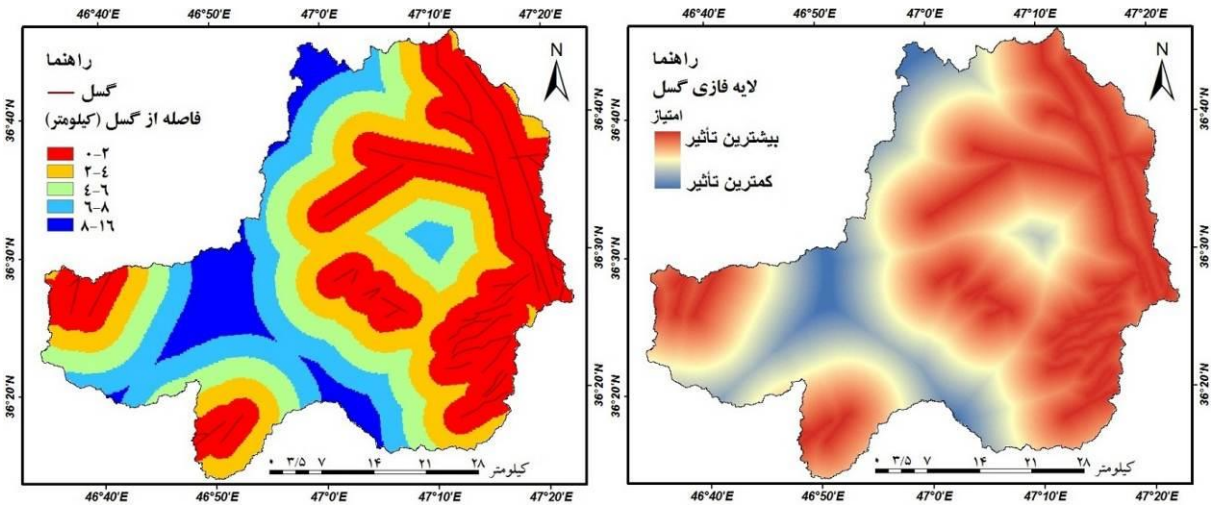
شکل ۳: نقشه فازی تأثیر بارش بر توسعه کارست منطقه و نقشه خطوط هم‌باران (منبع: نگارندگان)

دما: دما نیز به عنوان یک پارامتر اقلیمی موثر در توسعه مناطق کارستیک محسوب می‌شود و مناطقی که دارای کم‌ترین میزان دما هستند بهترین شرایط را برای کارستی شدن فراهم می‌آورند. در شکل ٤ نقشه طبقاتی و فازی شده دمای حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل٤: نقشه فازی تأثیر دما بر توسعه کارست منطقه (منبع: نگارندگان)

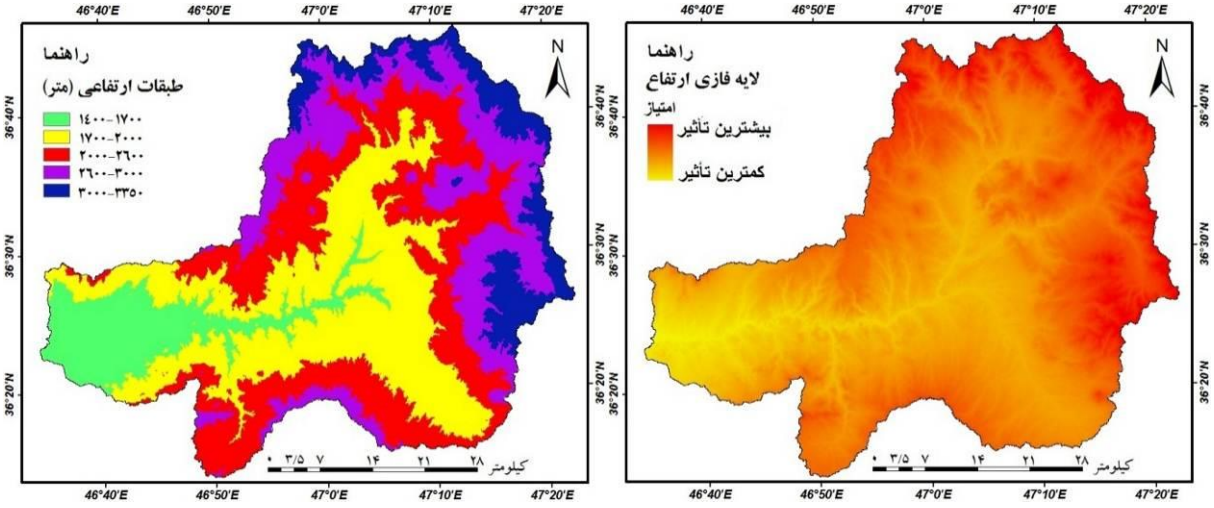
گسل: درز و شکاف‌ها نیز به عنوان عوامل مهم در توسعه مناطق کارستیک محسوب می‌شوند. میزان نفوذ آب در مناطقی که دارای درز و شکاف بیش‌تری است بسیار بیش‌تر از سایر مناطق است و به دلیل افزایش نفوذ و سطح تماس آب، میزان انحلال در این مناطق بیش‌تر از سایر نواحی است. در شکل ۵ نقشه طبقاتی و فازی سازی شده گسل‌های حوضه نشان داده شده است.



شکل ۵: نقشه فازی تأثیر گسل بر توسعه‌ی کارست و نقشه‌ی فاصله از گسل (منبع: نگارندگان)

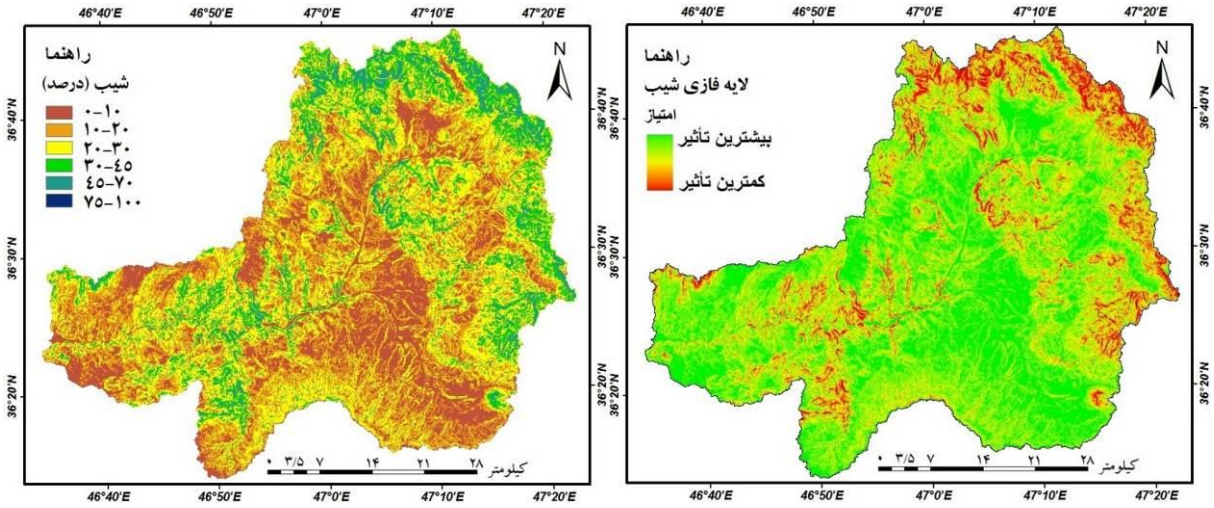
ارتفاع: ارتفاع نقش مستقیمی بر عوامل هیدرواقلیمی دارد. در طبقات ارتفاعی مختلف نوع سازند، درصد شیب، نوع اقلیم، پوشش-گیاهی، رودخانه و همچنین میزان نفوذپذیری متفاوت است به همین دلیل در طبقات ارتفاعی مختلف میزان توسعه یافتگی متفاوت

خواهد بود به طوری که در طبقات ارتفاعی ۲۶۰۰ متر به بالا با افزایش بارش و کاهش دما بیش‌ترین توسعه کارست را در منطقه داریم. در شکل ٦ نقشه طبقاتی و فازی شده ارتفاع نشان داده شده است.



شکل٦: نقشه فازی تأثیر طبقات ارتفاعی بر توسعه‌ی کارست و نقشه‌ی طبقات ارتفاعی (منبع: نگارندگان)

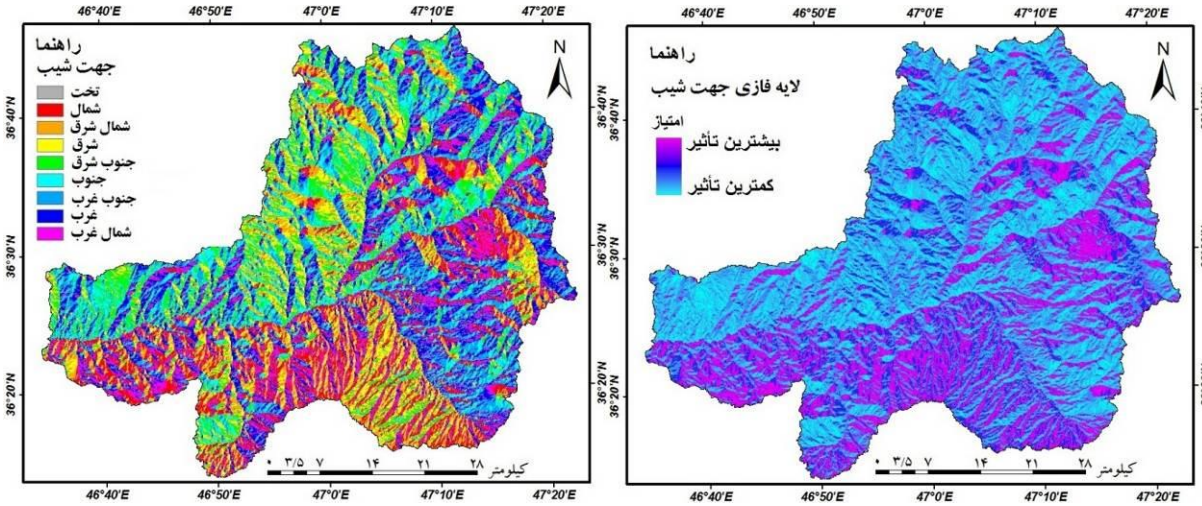
شیب: با توجه به اینکه سرعت جریان آب در سطح زمین در ارتباط مستقیم با شیب قرار دارد، شیب از پارامترهای بسیار مهم محسوب می‌شود. مناطقی که دارای شیب کم‌تری هستند، آب فرصت بیش‌تری برای نفوذ دارد و در نتیجه پتانسیل بیش‌تری جهت توسعه مناطق کارستیک دارند. این مناطق در حوضه‌ی مورد مطالعه بخش‌های مرکزی، جنوبی و غربی حوضه را بیشتر به خود اختصاص داده است. در شکل ۷ نقشه طبقاتی و فازی شده شیب حوضه نشان داده شده است.



شکل ۷: نقشه فازی تأثیر شیب بر توسعه کارست منطقه و نقشه شیب (منبع: نگارندگان)

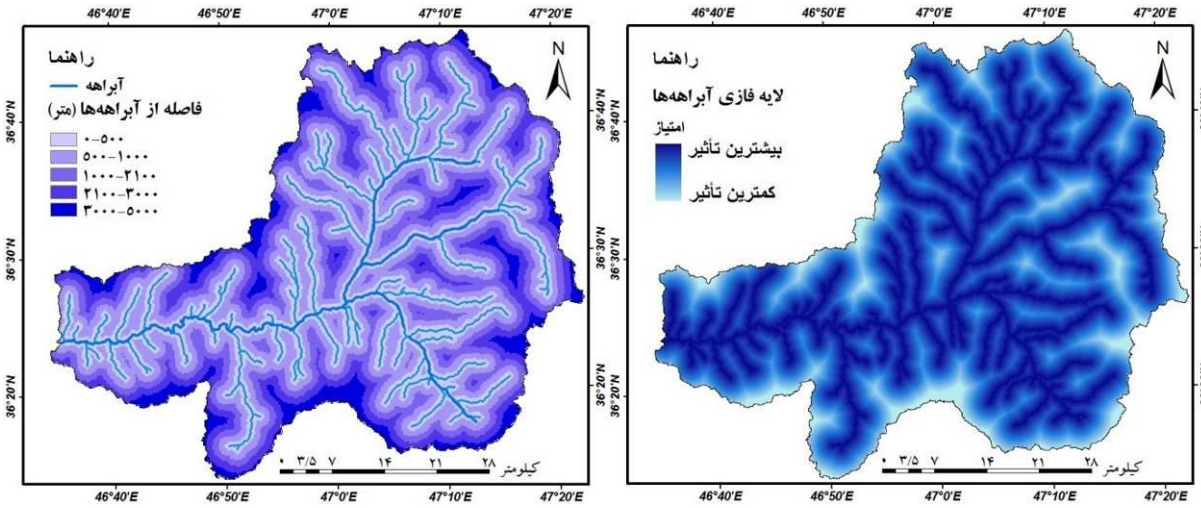
جهت شیب: میزان تبخیر و رطوبت در دامنه‌های مختلف متفاوت است. دامنه‌های شمالی به طور معمول مرطوب‌تر از دامنه‌های شمالی هستند به همین در این مناطق شرایط برای توسعه فعالیت‌های کارستیک فراهم‌تر است. بر این اساس در لایه جهت شیب

به جهات شمال، شمال شرق و شمال غرب بیش‌ترین امتیاز و به جهات جنوب و جنوب شرق کم‌ترین امتیاز داده شده است (شکل ۸).



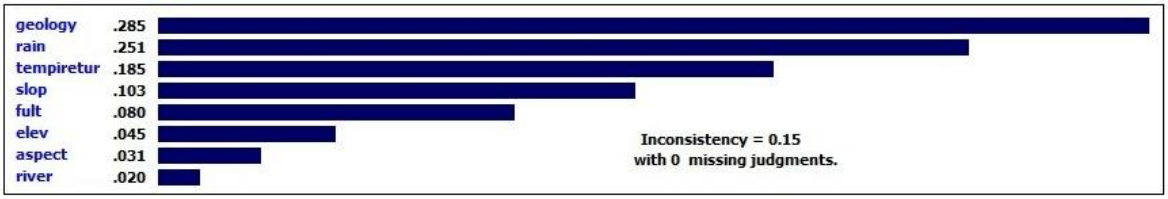
شکل ۸: نقشه فازی تأثیر جهت شیب بر توسعه کارست منطقه و نقشه جهت شیب (منبع: نگارندگان)

آبراهه: میزان نفوذپذیری و تغذیه در مناطق نزدیک رودخانه‌ها بیش‌تر است و این عامل سبب می‌شود تا در این مناطق، فرصت توسعه فعالیت‌های کارستیک فراهم باشد. بر این اساس مناطقی که نزدیک رودخانه‌ها هستند دارای ارزش نزدیک به ۱ و مناطق دورتر دارای ارزش نزدیک به صفر هستند. در شکل ۹ نقشه طبقاتی و فازی شده آبرهه‌های حوضه نشان داده شده است.



شکل ۹: نقشه فازی تأثیر آبراهه بر توسعه کارست و نقشه‌ی فاصله از آبراهه (منبع: نگارندگان)

-وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی: با توجه به اینکه ارزش و اهمیت لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده یکسان نیست، در این تحقیق به منظور ارزش‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شده است. با توجه به مدل مورد استفاده، پارامترهای مورد نظر به صورت زوجی و بر اساس نظر کارشناسان (۵ متخصص ژئومورفولوژی) ارزش‌گذاری شده است که در شکل ۱۰ و جدول ۱ نتایج آن نشان داده شده است.

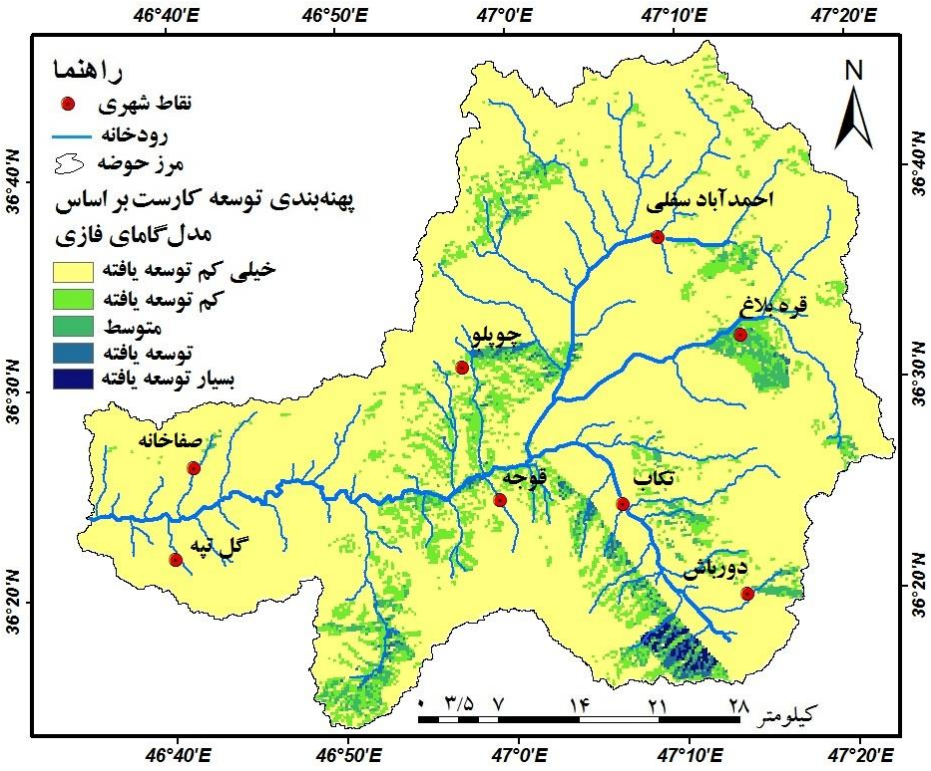


شکل۱۰: ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست (منبع: نگارندگان)

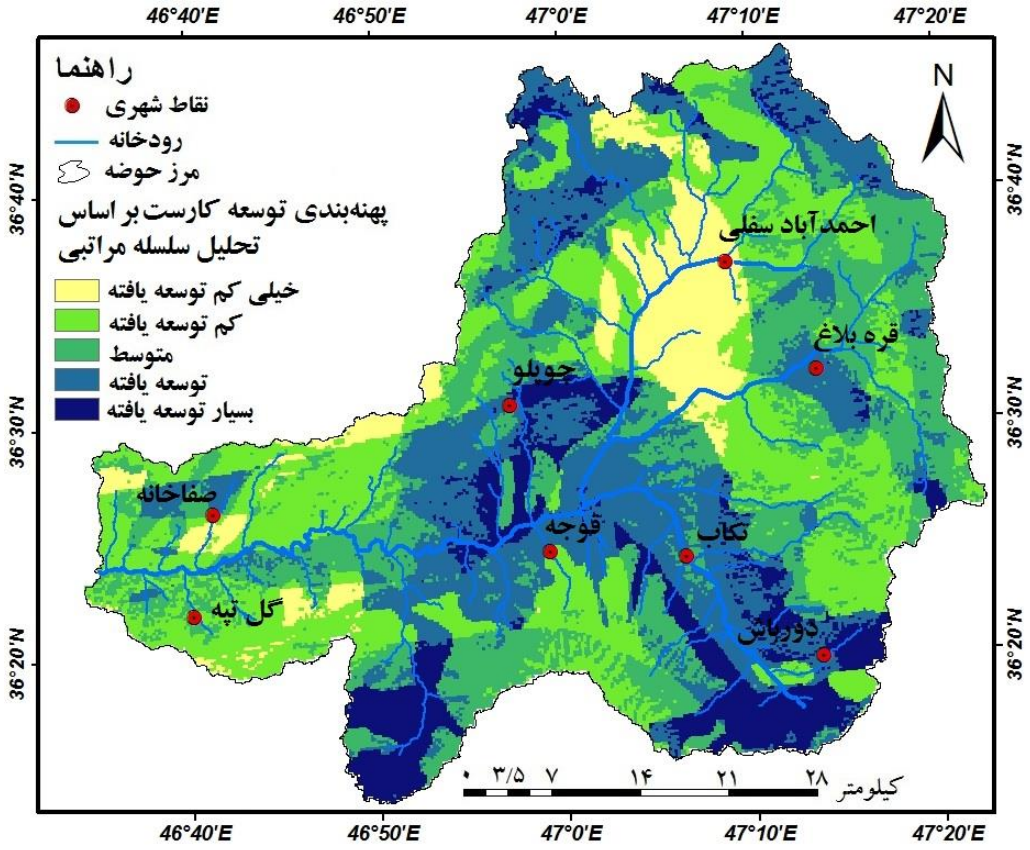
جدول ۱: ارزش‌گذاری لایه‌ها بر اساس نظر کارشناسان (منبع: نگارندگان)

اسم لایه	شیب	جهت شیب	بارش	دما	رودخانه	زمین‌شناسی	دامنه ارتفاعی	گسل
ارزش	۰/۱۰۳	۰/۰۳۱	۰/۲۵۱	۰/۱۸۵	۰/۰۲۰	۰/۲۸۵	۰/۰٤٥	۰/۰۸۰

پس از ارزش‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی، در نهایت با انجام گامای فازی برای تمام لایه‌ها، نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی توسعه‌ی کارست در حوضه‌ی تکاب به دست آمده است و با بازدید نهایی میدانی، درستی و صحت آن مورد ارزیابی قرار گرفته شده است (شکل۱۱). نقشه‌ی نهایی دیگر پهنه‌بندی توسعه‌ی کارست با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی یا (AHP) به دست آمده است، که باتوجه به ارزش گذاری انجام شده بود از طرف کارشناسان (جدول۱) به دست آمده است (شکل۱۲).



شکل ۱۱: نقشه نهایی پهنه‌بندی کارست براساس مدل گامای فازی (منبع: نگارندگان)



شکل ۱۲: نقشه نهایی پهنه‌بندی توسعه‌ی کارست با استفاده از مدل (AHP) (منبع: نگارندگان)

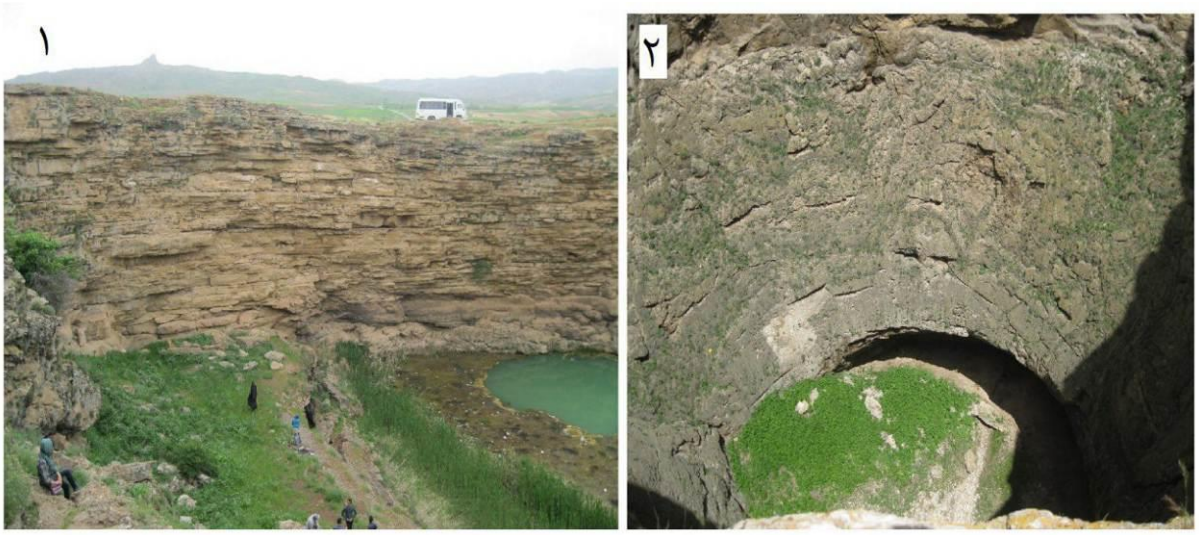
نتیجه‌گیری

بر پایه نتایج حاصل از عوامل مؤثر در توسعه یافتگی کارست، منطقه‌ی مورد مطالعه را می‌توان به پنج منطقه بسیار توسعه‌یافته، توسعه‌یافته، متوسط، کم توسعه‌یافته و خیلی کم توسعه‌یافته تقسیم کرد. در نقشه پهنه‌بندی AHP بیشترین مساحت مربوط به طبقه‌ی دوم یعنی کم توسعه‌یافته می‌باشد اما در نقشه‌ی پهنه‌بندی گامای فازی بیشترین مساحت مربوط به طبقه‌ی اول یعنی خیلی کم توسعه‌یافته می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲: طبقه‌بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس توسعه‌یافتگی کارست (منبع: نگارندگان)

طبقه	طبقه ٥	طبقه ٤	طبقه ۳	طبقه ۲	طبقه ۱
مدل	بسیار توسعه‌یافته	توسعه یافته	متوسط	کم توسعه یافته	خیلی کم توسعه یافته
گامای فازی	۷/۷۵	۲۱/۴۶	۶۸/۳	۲۲۰/۴۸	۲۰۷۲/۹
درصد	٪ ۰/ ۳	٪ ۰/ ۹	٪ ۲/۸	٪ ۹/۲	٪ ۸۶
AHP	۶۶۶/۲	۱۲/۹۸	۶۳۷/۱۱	۶۷۱	۲۰۲
درصد	٪ ۲۷/۸	٪ ۰/۵	٪ ۲۶/۵	۲۸٪	٪ ۸/۴

با توجه به اینکه در بین عوامل تأثیرگذار عامل زمین‌شناسی و بارندگی بیشترین تأثیر را در کارستی شدن دارند، در طبقات بسیار توسعه‌یافته و توسعه‌یافته از عامل زمین‌شناسی شامل سنگ‌های آهکی و از عامل بارندگی شامل ۵۰۰ میلی‌متر به بالا می‌باشد و بیشتر در مرکز و جنوب حوضه قرار گرفته است. طبقه‌ی متوسط در بین عوامل تأثیرگذار در توسعه‌ی کارست شامل ویژگی‌هایی است که تأثیر آن‌ها بر توسعه و عدم توسعه برابر است که بیشتر در شرق حوضه قرار دارد. طبقات کم توسعه‌یافته و خیلی کم توسعه‌یافته، از عامل زمین‌شناسی شامل گرانیت‌ها و سنگ‌های آتش‌فشانی و از عامل بارندگی شامل ۳۰۰ میلی‌متر کمتر می‌باشد و به همین دلیل توسعه‌یافتگی کارست کم و خیلی کم می‌باشد که بیشتر در غرب و جنوب غرب شهر احمدآباد سفلی قرار دارد. در نهایت با مقایسه کردن دو روش گامای فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی از نظر بیشترین صحت و درستی نقشه‌ها، با بازدیدهای میدانی این نتیجه به دست آمده است (اشکال۱۳و۱٤) که پهنه‌بندی حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP) بیشترین تطابق را با واقعیات منطقه دارد. با توجه به نمونه بازدیدهای میدانی می‌توان گفت که منابع آب‌های خوبی مثل تخت سلیمان و زندان نبی‌کندی در طبقه‌های بسیار توسعه یافته و توسعه یافته قرار دارد واین شواهد نشان دهنده منابع آبی زیرزمینی و چشمه‌های کارستی (وکلوزین) می‌باشد که در حوضه آبریز مورد مطالعه در مرکز و جنوب آن قرار دارد و می‌تواند در مطالعات مربوط به وزارت نیرو مورد استفاده قرار گیرد.



شکل۱۳: شواهد میدانی.۱- فروچاله نبی کندی ۲- زندان سلیمان (منبع، نگارندگان)

شکل١٤: شواهد میدانی. ۱-انحلال سنگ‌های کربناته و تشکیل لاپیه‌های خطی ۲- انحلال شدید سنگ‌های کربناته و تشکیل اشکال لانه‌زنبوری ۳و٤ نمونه‌ای از چشمه‌های فعال و نیمه فعال همراه با املاح(منبع نگارندگان)

منابع

۱- جعفربیگلو، منصور؛ ابراهیم مقیمی و فرشاد صفری (۱۳۹۰). استفاده از DEM در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله های کارستی توده پرآو بیستون. مجله‌ی جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ٤٤، صص ۱۸-۱.

۲- ملکی، امجد؛ شوهانی،داوود و محمود علایی‌طالقانی (۱۳۸۸). پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه، فصلنامه مدرس علوم انسانی، دوره۱۳، شماره۱.

۳- میرعلایی موردی، مهدی؛ میراب شبستری، غلامرضا؛ اعتباری، بهروز و محمودرضا هیهات (۱۳۹۲). جغرافیا و آمایش شهری- منطقه ای، شماره۸ ، صص ۱۳۰- ۱۱۵.

٤- ناصری، حمیدرضا و یعقوب نیک‌قوچ (۱۳۹۱). نقش کارست ژیپسی در انتقال آلاینده‌ها از سد باطله معدنی آق دره- تکاب. محیط شناسی، سال۳۲، شماره٦١، صص ٤٨-٤١.

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

٦- یمانی، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ جعفری‌اقدم، مریم؛ باقری سیدشکری، سجاد (١٣٩٠). بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP، استان کرمانشاه. مجله علوم زمین، سال ٢٢، شماره ٨٨ ، صص ٦٦-٥٧.

٧- خدری، اکبر؛ رضایی، محسن و جواد اشجاری (١٣٩٠). چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. صص ٤٨-٣٨.

٨- رضایی‌مقدم، محمدحسین و محمدرضا قدری (١٣٨٤). کارن‌ها، متنوع‌ترین پدیده‌های کارست در منطقه تخت سلیمان. مجله تحقیقات جغرافیایی، دوره ٢٠، شماره ١، صص ١٣٨-١٢٣.

٩- طاهری، کمال (١٣٨٤). گزارش عملکرد سالیانه دفتر مطالعات و تحقیقات کارست غرب کشور، شرکت آب منطقه‌ی کرمانشاه، معاونت مطالعات پایه منابع آب، آرشیو داخلی، صص٤٥-٣٠.

١٠- علایی‌طالقانی، محمود و زهرا رحیم‌زاده (١٣٨٩). بررسی تحول کارست در منطقه‌ی زاگرس. نخستین کنفرانس پژوهش-های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، اردیبهشت، صص ٣٤٠-٣٢٩.

١١- علایی طالقانی، محمود (١٣٩٠). ژئومرفولوژی ایران. نشر قومس، صص١٢٠.

١٢- مقصودی، مهران؛ کریمی، حاجی؛ صفری، فرشاد و ذبیح‌اله چهارراهی (١٣٨٨). بررسی توسعه کارست در توده پرآو-بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ٤١، شماره ٦٩، صص ٦٥-٥١.

15- Alesheikh, A, Soltani, M, Nouri, N & M Khalilzadeh, (2008). Land Assessment for Flood Spreading Site Selection Using Geospatial In formation System, International Journal of Environmental Science and Technology, Vol .5, No .4, Pp. 455-462.

16- Calic, Jelena (2011). Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term, Geomorphology, Vol. 134, No. 1, Pp. 32-42.

17- Gunn, J. (2013). Denudation and Erosion Rates in Karst, Treatise on Geomorphology, Vol. 6, 72-81.

18- Inkpen, Rob; Viles, Heather; Moses, Cherith & Brian Baily (2012). Modelling the impact of changing atmospheric pollution levels on limestone erosion rates in central London, 1980–2010, Atmospheric Environment, Vol. 61, Pp. 476-481.

19- Jiang, Hong and Ronal Eastman (2000). Application of fuzzy meas urment in multi_critria evaluation in GIS. International Journal of Geographical Information Science, vol.14, No. 2, pp. 173-184.

20- Kranjc, A (2013). Classification of closed depressions in carbonate karst, Treatise on Geomorphology, Vol. 6, Pp. 104-111, DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00125-1.

21-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. United States Environmental Protection Agency.

22- Plan, Lukas. (2005). Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps, Geomorphology, Vol. 68, No. 3–4, Pp. 201-212.

23- Van Brahana, Jahn (2011). Karst aquifers. encyclopedia of water science, Second Edition, DOI: 10.1081/E-EWS2-120010039.