

پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در توده آهکی بیستون با استفاده از مدل منطق‌فازی

علی دسترنج^{۱*}، احمد نوحه‌گر^۲، جواد رفیع شریف‌آباد^۳

استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد
آگروه برنامه‌ریزی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران
آدکتری بیابان‌زدایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، ایران
تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۴

چکیده

توده آهکی بیستون در شمال و شمال‌شرقی استان کرمانشاه و در واحد ساختمانی زاگرس مرتفع قرار دارد. با توجه به گستردگی، خلوص و ضخامت سازند آهکی بیستون، تراکم بالای گسل‌ها، درزه و شکاف، اختلاف ارتفاع بالا و همچنین وجود شرایط اقلیمی مناسب، لندفرم‌های کارستی توسعه یافته‌ای در این توده شکل گرفته است. هدف این پژوهش پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در توده آهکی بیستون با استفاده از مدل منطق‌فازی می‌باشد. در مجموع نه عامل سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، بارش، دما، خاک، کاربری (پوشش گیاهی)، شیب و جهت شیب به عنوان متغیرهای مستقل در فرایند کارست‌زایی و توسعه آن و همچنین شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست در منطقه مورد بررسی، دخیل می‌باشند. از آنجایی که ژئومورفولوژی کارست بر میزان شارژ و ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی و بررسی میزان آسیب‌پذیری آنها، تاثیر بسزایی دارد، تهیه نقشه توسعه‌یافتگی سطحی کارست و میزان تأثیر عوامل مختلف در نفوذپذیری سازندها، لازم و ضروری می‌باشد. از مدل منطق‌فازی (عملگر گاما) به منظور تحقق این هدف، استفاده شده است. براساس نتایج حاصله، توده بیستون به لحاظ پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی به چهار منطقه فاقد کارست، کارست با توسعه کم، کارست با توسعه متوسط و مناطق توسعه یافته کارستی تقسیم گردید. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حاصله با فروچاله‌ها و پولیه‌های کارستی، حاکی از دقت بالا و کارایی مطلوب این مدل در ارزیابی توسعه کارست سطحی می‌باشد؛ همچنین، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، نقش موثر سنگ‌شناسی (سازند بیستون) را در فرایند توسعه‌یافتگی کارست نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، کارست، منطق‌فازی، بیستون

مقدمه

سیستم خاص زهکشی سطحی و زیرسطحی را ایجاد نموده‌اند. وایت (۱۹۸۸)^۳ معتقد است که فرایند کارست‌زایی، حاصل یک تعادل چند منشأ یا به عبارتی، حاصل تعادل بین فاز جامد (لیتوسفر)، فاز مایع (هیدروسفر) و فاز گازی (اتمسفر) است. از آنجایی که بیش از نیمی از مساحت سازندهای کربناته ایران در زاگرس واقع است، اهمیت این سازندها در این مناطق، بیش از پیش است (افراسیابیان، ۱۳۷۷). این پهنه‌ها در استان کرمانشاه، نقش مهمی در تغذیه آبخوان‌ها بر عهده دارند. وجود بیش از ۵۵۰ سراب و

کارست، چشم‌اندازهای ایجاد شده توسط انحلال در سنگ‌های کربناته است و آب و نقش آن در روند انحلال، مهمترین عامل ایجاد کارست می‌باشد (ون بینن، ۲۰۱۱). به بیان دیگر، واژه کارست به مناطقی اطلاق می‌گردد که فرایند انحلال فرایند برتر شکل‌زایی بوده و با انحلال سازندهای انحلال‌پذیر، لندفرم‌های خاص ژئومورفولوژیکی را در سطح، زیرسطح و عمق زمین شکل داده و این لندفرم‌ها،

*نویسنده مسئول: dastranj66@gmail.com

2. Van Beynen, 2011

3. White, 1988

پوشش‌زمین، سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی و خصوصیات خاک را به دست آوردند سپس این لایه‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی ترکیب خطی وزن‌دهی شدند. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه دارای پتانسل تغذیه متوسط تا زیاد (تقریباً ۴۹ درصد) می‌باشد. رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) یا استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی^۶ (RF) و حداکثر آنتروپی^۷ (ME) در منطقه مهران ایران به تهیه پتانسیل آب‌های زیرزمینی کردند. نتایج نشان داد مدل‌های RF و ME مدل‌های مناسبی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشند.

با توجه به اهمیت مناطق کارستی در تغذیه منابع آب زیرزمینی به خصوص در زون زاگرس، پژوهش‌های گوناگونی صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

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). 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، ترکیب سنگی، زمین ریخت‌شناسی، دما، بارش، تبخیر و شیب و نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده از مناطق مختلف استان را از نظر درجه توسعه یافتگی 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 خرد شده نسبت به

چشمه کارستی در استان کرمانشاه، نقش بسیار حیاتی در تأمین آب آشامیدنی و مصارف صنعتی و کشاورزی دارند (ملکی و شوهانی، ۱۳۸۶). کان کول^۱ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از پارامترهای بارش، شیب، تراکم زهکشی و عمق آب زیرزمینی به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) در منطقه Huay Sai در تایلند نقشه پتانسل آب‌زیرزمینی را به‌دست آوردند. اوی کانونمیدیس^۲ و همکاران (۲۰۱۵) با تلفیق سنجش از دور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در منطقه Tirnavos در یونان پرداختند. برای به‌دست آوردن نقشه پتانسیل آب‌زیرزمینی (GPM) از لایه‌های بارش، سنگ‌شناسی، پتانسیل تغذیه، تراکم خطواره، شیب، تراکم زهکشی و عمق آب‌های زیرزمینی استفاده شد. نتایج نشان داد که منطقه از نظر پتانسیل آب‌زیرزمینی دارای پنج کلاس خیلی خوب تا خیلی کم می‌باشد؛ همچنین نتایج به دست آمده، اطلاعات و نقشه‌های مهمی را برای مسئولین محلی برای بهره‌برداری و مدیریت منابع آب زیرزمینی فراهم کرد. سلوا فاروک^۳ (۲۰۱۵) در پژوهشی در مصر اقدام به تهیه نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی کرد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده کلاس‌های پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد می‌باشد، که کلاس‌های کم و متوسط بیشترین مساحت را در کشور مصر به خود اختصاص داده‌اند. آلین فرانسس^۴ و همکاران (۲۰۱۵) از سنجش از دور و شرایط هیدروژئومورفولوژیک برای طراحی مدل‌های اداری (Conceptual) هیدرولوژیکی در سازندهای کربناته در اسپانیا استفاده کردند. سنانایاک^۵ و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای به بررسی پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی در سریلانکا به کمک تکنیک GIS پرداختند. آنها ابتدا لایه‌های بارش، خطواره‌ها، شیب، زهکشی، کاربری زمین،

1. Konkul
2. Oikanomidis
3. Salwa Farauk
4. Alain Frances
5. Senanayake

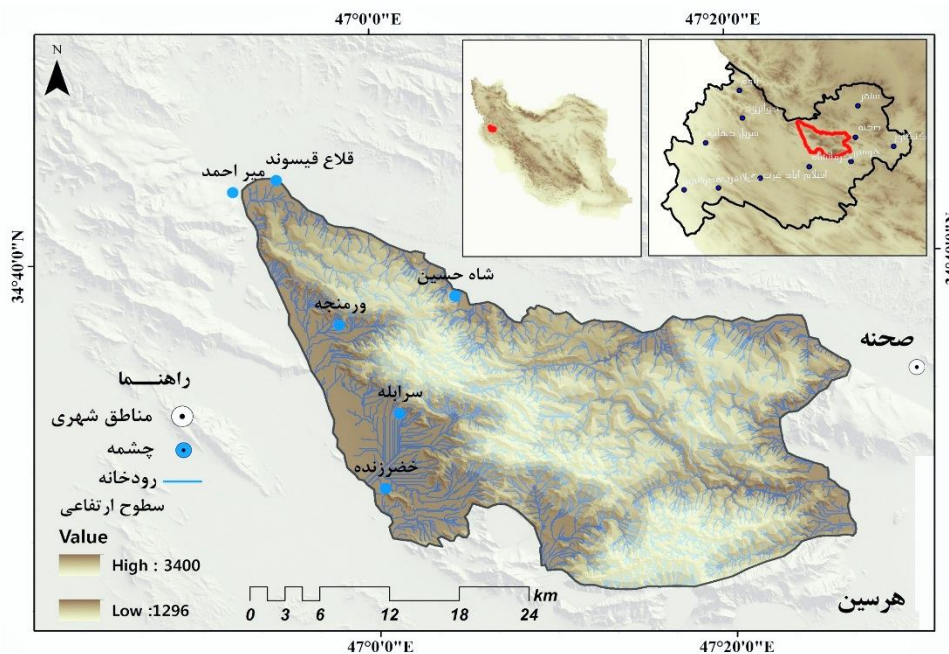
6. Random Forest
7. Maximum Entropy

(۱۳۹۴) با استفاده از تابع گاما فازی تحت نرم‌افزار ArcGIS به پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در زاگرس جنوبی پرداختند؛ همچنین می‌توان به مطالعات یوسفی‌راد، ۱۳۸۸؛ میرعربی و همکاران، ۱۳۸۹؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۳؛ دشت برمکی و همکاران، ۱۳۹۴ و... نیز اشاره نمود. در ادامه به منظور درک بهتر به توضیح مختصری از لندفرم‌های کارستی که در این مقاله اشاره شده می‌پردازیم:

کارن: به شکاف‌ها یا حفره‌های انحلالی در زمین‌های کارستی (سنگ آهک و دولومیت)، کارن گویند که ممکن است تا چندین متر در امتداد سیستمی از شکاف‌های مورب و متقاطع در سنگ آهک، توسعه یابند. نواحی و سطوح گسترده‌ای که در آنها کارن‌ها توسعه یافته‌اند، کارن فیلد نامیده می‌شوند (هاگت^۱، ۲۰۰۳: ۶۸). گرایک‌ها^۲ یا کلافت کارن‌ها، مهم‌ترین عارضه در اغلب مجموعه‌های کارنی می‌باشند. آن‌ها، زهکش‌های اصلی به اپی کارست عمیق‌تر، یا به فروچاله‌ها و یا به تخلیه‌های سطحی نظیر کانال‌های رودخانه‌ای هستند. این عوارض در امتداد دسته درزه‌های اصلی شکل گرفته و با زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به هم برخورد می‌کنند. غارها، مجاری انحلالی بزرگی می‌باشند که در محل گسستگی‌ها، به صورت افقی یا عمودی شکل گرفته و به وسیله معابری با سطح زمین مرتبط می‌شوند. پولیه، فروافتادگی‌های ایجاد شده در سنگ‌های آهکی با کف تقریباً مسطح و محصور می‌باشد (فورد و ویلیامز^۳، ۲۰۰۷: ۱۷۳). دولین^۴ (سینک‌هول یا فروچاله) به لندفرم‌های خاص ایجاد شده بوسیله فرایندهای کارستی گفته می‌شود، که بوسیله فروافتادگی‌های مدور با شبکه زهکشی زیرزمینی، مشخص می‌شوند (تیهانسکی^۵، ۱۹۹۹: ۱۲۱). در زبان انگلیسی، سینک‌هول، فروچاله و چاله‌های بلعنده، واژه‌های معادل دولین می‌باشند (هاگت، ۲۰۰۳: ۷۸).

سراب نیلوفر در زاگرس چین‌خورده به علت درز و شکاف بیشتر و وجود گسل، میزان انحلال بالاتر و تحول یافتگی بیشتری دارد. یمانی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی عوامل موثر در توسعه یافتگی و پهنه‌بندی کارست در حوضه چله استان کرمانشاه با استفاده از مدل منطق فازی پرداختند و براساس متغیرهای مورد بررسی، منطقه مورد مطالعه را به چهار پهنه مناطق فاقد کارست، کارست با توسعه کم، کارست با توسعه متوسط و کارست توسعه یافته تقسیم نمودند. بهرامی و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای نقش ژئومورفولوژی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز کنگیر در استان ایلام را مورد بررسی قرار دادند. باقری و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی به ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی در آبخوان‌های کارستی گیلانغرب و خورین در استان کرمانشاه پرداختند. یوسفی سنگانی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با تلفیق مدل فازی و مدل سلسله‌مراتبی در شمال‌شرق کوه‌های هزار مسجد پرداخته و روش فازی را برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی مناسب دانسته‌اند. زروش و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی به بررسی درجه اهمیت عوامل موثر در توسعه کارست در بخشی از پهنه کارستی زاگرس در محدوده تاق‌دیس کبیرکوه در استان ایلام پرداختند. بدین‌منظور لایه‌های اطلاعاتی سنگ‌شناسی، چگالی خطواره‌ها، شیب سطح زمین، بارش، ارتفاع، پوشش گیاهی و تراکم آبراهه‌ها با استفاده از اطلاعات رقومی سنجش از دور، نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی و آمار بارش فراهم شد و برای تهیه مدل پتانسیل توسعه کارست به نرم افزار ArcGIS معرفی شد. حیدری ساربان و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل فازی به پهنه‌بندی تناسب زمین به منظور توسعه فیزیکی شهر با استفاده از پارامترهای طبیعی پرداخته و به کارایی این مدل تاکید داشته‌اند. مقصودی و همکاران

1. Huggett, 2003
2. Grikes
3. Ford, D., & Williams, 2007
4. Doline
5. Tihanski, 1999



شکل ۱: موقعیت توده آهکی بیستون

تأثیر آن در بیلان آبی منطقه ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین، هدف از این پژوهش، تاثیر پارامترهای مهم در توسعه یافتگی کارست سطحی منطقه با استفاده از مدل فازی می‌باشد.

محدوده و قلمرو پژوهش

توده آهکی بیستون دارای مساحت ۱۰۱۵ کیلومتر مربع، با روند شمال غربی-جنوب شرقی بین عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ} 25'$ تا $34^{\circ} 45'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $45^{\circ} 55'$ تا $47^{\circ} 30'$ شرقی و در واحد ساختمانی زاگرس مرتفع واقع شده است و در آن رخنمون‌هایی از سنگ‌های کرتاسه فوقانی تا کواترنری سازند بیستون (آهک ضخیم لایه بیستون)، سازند قم (آهک‌های کرم رنگ متوسط تا ضخیم لایه سنگواره‌دار) و آبرفت‌های کواترنری دیده می‌شود. فعالیت گسل‌های معکوس و بزرگ به صورت صفحات رورانده، عامل مهم توجیه ناهمواری‌های بیستون می‌باشد. در زون زاگرس مرتفع، لایه‌های آهکی بر اثر راندگی بر روی هم قرار گرفته و سیستم‌های فلسی را بوجود آورده و این امر شکل دهنده تاق‌دیس‌های زون زاگرس مرتفع می‌باشد. در این توده آهکی، به دلیل

شافت (چاه عمودی) این لندفرم، شبیه یک لوله استوانه ای قائم یا نزدیک به قائم می‌باشد که یا در اثر عمل انحلال یا فروریزش، در امتداد درزه و شکاف‌های عمودی، شکل می‌گیرند (مونرو، ۱۹۷۰: ۱۴) و فروریزش سقف مجراها و غارهای زیرزمینی در توسعه آنها نقش دارد. پیناکل: انحلال در طول درزه و شکاف‌های موجود در سطوح آهکی، باعث باقی ماندن بلوک‌هایی از آهک به صورت مخروط یا برج‌هایی بر روی سطوح آهکی می‌شود که پیناکل نامیده می‌شوند. برج‌های کارستی از نظر فرم، بصورت متقارن و یا نامتقارن بوده و منعکس‌کننده تأثیر شیب و فرایندهای فرسایش می‌باشند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷: ۱۷۴).

وجود چشمه‌های مهمی چون ورمنج، سرابله، میراحمد، شاه حسین، خسرزنده و قلاع قیسوند در توده مورد بررسی، نشان از ارتباط نزدیک منابع آب زیرزمینی با توسعه کارست سطحی در منطقه دارد، بنابراین، این مسئله با بسیاری از فعالیت‌های انسانی از جمله شرب، کشاورزی، صنعت و خدمات ارتباط تنگاتنگی داشته و شناخت میزان توسعه یافتگی و پهنه‌بندی کارست سطحی توده از این نظر با توجه به

1. Shaft
2. Monroe, 1970

(شکل ۲). لازم به ذکر است که معیار مرزبندی آبخوان در این پژوهش، کوهستان (توده) بیستون دارای توده آهکی دوره کرتاسه می‌باشد (شکل ۱).

وجود آهک ضخیم لایه بیستون، اشکال سطحی توسعه یافته‌ای همچون سینک‌هول (فروچاله)، کارن، کارن فیلد، غار، لاپیه، پولیه و... شکل گرفته است



شکل ۲: نمایی از لندفرم‌های کارستی الف. گرایک، ب. کارن ج. پولیه و فروچاله‌های شکل گرفته در کف آن د. دولین و. شافت ی: پیناکل

ریدیایی، به منظور شناخت مسیر جریان آب‌های زیرزمینی و تعیین مرز حوضه آبریز کارستی، تهیه نقشه فروچاله‌ها، یک پیش نیاز اساسی محسوب می‌شود (انجل و همکاران^۱، ۲۰۰۴: ۹۲). فروچاله‌های کارستی با استفاده از روش‌های FillSink و مدل‌سازی فروچاله‌های کارستی، شناسایی و نتایج با برداشت‌های میدانی دقت‌سنجی گردید. در مجموع نه عامل سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، بارش، دما، خاک، کاربری، شیب و جهت شیب در فرایند کارست

مبانی نظری

این پژوهش یک تحقیق توسعه‌ای- کاربردی مبتنی بر روش‌های کتابخانه‌ای، میدانی و پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی توده آهکی بیستون است. در طی بازدیدهای میدانی، لندفرم‌های کارستی منطقه شناسایی گردید. فروچاله‌ها به عنوان شاخصی برای مدل‌سازی لندفرم‌های کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این لندفرم‌ها، نقش بسیار مهمی در سیستم هیدرولوژیکی و ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی در مناطق کارستی، ایفا نموده و تغذیه متمرکز از طریق آنها صورت می‌گیرد. در مطالعات

1. Angel et al, 2004

۹۳). در تئوری مجموعه‌های دقیق، اگر یک مجموعه را در نظر بگیریم، هر عضو مجموعه مرجع یا در مجموعه هست و یا نیست و می‌توان برای هر مجموعه A تابع زیر را تعریف کرد (مومنی، ۱۳۸۹: ۱۲۳).

رابطه (۱)

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

این تابع به هر عضو مجموعه A عدد یک و به هر عضو خارج از مجموعه A عدد صفر نسبت می‌دهد.

روش فازی با پنج عملگر که هر یک دارای نحوه عمل خاصی هستند، در محیط نرم‌افزار ArcGIS قابل اجرا می‌باشد (کارت^۲، ۱۹۹۶: ۲۷۰). اجتماع فازی^۳، اشتراک فازی^۴، ضرب فازی^۵، جمع فازی^۶ و گاما^۷ با توجه به شناخت از منطقه بهترین عملگر انتخاب شد (ناجی، ۱۳۹۷: ۱۲۳). به دلیل نقش تبدیلی عملگر گاما و نزدیک به واقعیت بودن آن، در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

گاما: عملگر گاما نقش تبدیلی نسبت به نتیجه جمع و ضرب فازی دارد و حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی را تعدیل کرده و به واقعیت نزدیکتر می‌کند. مقدار گاما از طریق قضاوت کارشناسی مبتنی بر نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهده شده یا تجربیات موجود درباره موضوع مورد بررسی تعیین یا از طریق آزمون سعی و خطا، در تطبیق با شواهد، واقعی می‌گردد. از این رو، عملگر گاما موجب دستیابی به خروجی‌هایی می‌شود که مناسب‌ترین مقادیر ۷ را در تطبیق با واقعیت‌ها و در مقایسه با خروجی‌های حاصل از به کارگیری سایر عملگرها، مشخص می‌نماید. این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس رابطه (۲) تعریف می‌شود.

زایی و توسعه آن و همچنین شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست در منطقه مورد بررسی دخیل می‌باشند. لازم به ذکر است که نقشه کاربری براساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ کاربری استان کرمانشاه برداشت گردید. نقشه خاک با توجه به بررسی‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای و نقشه سطوح ارتفاعی بر مبنای مدل ارتفاع رقومی ۱۰ متر دریافتی از سازمان نقشه برداری تهیه و نقشه‌های شیب و جهت شیب از روی آن برداشت گردید. نقشه لیتولوژی و گسل نیز بر مبنای نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ کامیاران، میانراهان و کرمانشاه استخراج گردیده شد. نقشه‌های دما و بارش نیز بر مبنای اطلاعات دما و بارش دریافتی از سازمان هواشناسی کشور آماده گردید. از آنجایی که ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی و بررسی میزان آسیب‌پذیری آنها، تاثیر بسزایی دارد، تهیه نقشه توسعه یافتگی سطحی کارست، لازم و ضروری است. به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، از مدل منطق فازی و عملگر گاما استفاده می‌نماییم.

مدل‌های فازی اغلب در مدل‌سازی مسائلی که با عدم قطعیت ذاتی همراه هستند، مناسب‌اند. روش فازی در اصل یک روش وزندهی به لایه‌های مورد استفاده می‌باشد که قابل قبول‌ترین روش مکانیابی است. این روش، روشی دارای ریسک‌پذیری پایین و نتیجه‌دهی بسیار مناسبی و بالایی است (نصیری و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۵). تاثیر عوامل موثر در توسعه کارست، قطعی و صدصدی نیست. برای مطالعه چنین شرایط پیچیده و مبهمی، مدل فازی مناسب می‌باشد؛ زیرا با استفاده از نظریه فازی، می‌توان متغیرهای نادقیق و مبهم را، به شکل ریاضی درآورد (مومنی، ۱۳۸۹: ۳۲). در مدل فازی، هر فرد همزمان در مجموعه‌های مختلف اما به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک و یا خود این دو حد را می‌پذیرد (ون آلفن و همکار^۱، ۲۰۰۰:

2. Carter, 1996
3. Fuzzy OR
4. Fuzzy AND
5. Fuzzy Product
- 6-Fuzzy SUM
7. Fuzzy Gamma

1. Van Alphen and Stoorvogel, 2000

رابطه (۲)

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

در این رابطه $\mu_{\text{combination}}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین شده در محدوده صفر و یک است. زمانی که γ را برابر ۱ قرار دهیم، ترکیبی که اعمال می‌شود، همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد ترکیب، برابر با ضرب جبری فازی است. مقدار در نظر گرفته شده برای γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند، که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهش ضرب جبری فازی، سازگاری دارد (کارتر، ۱۹۹۶: ۷۸).

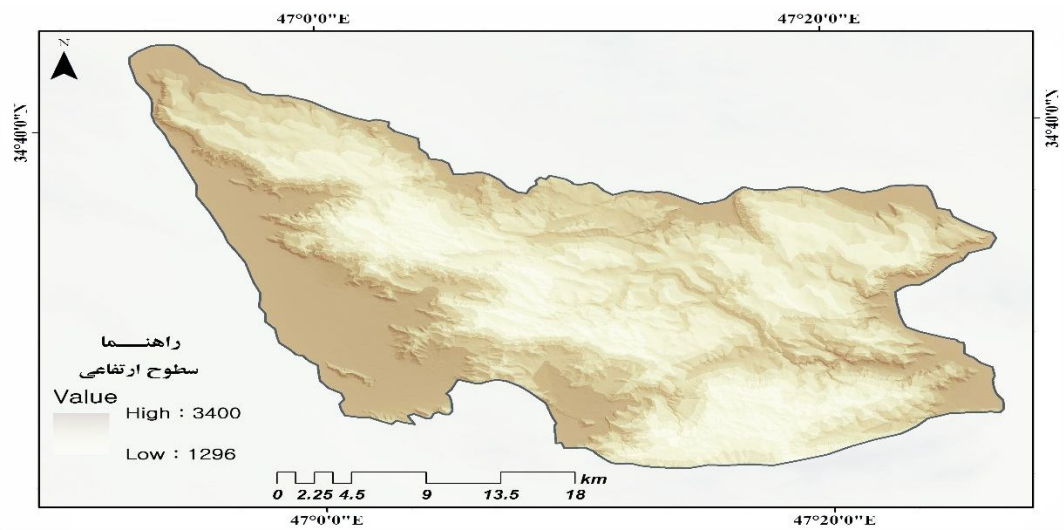
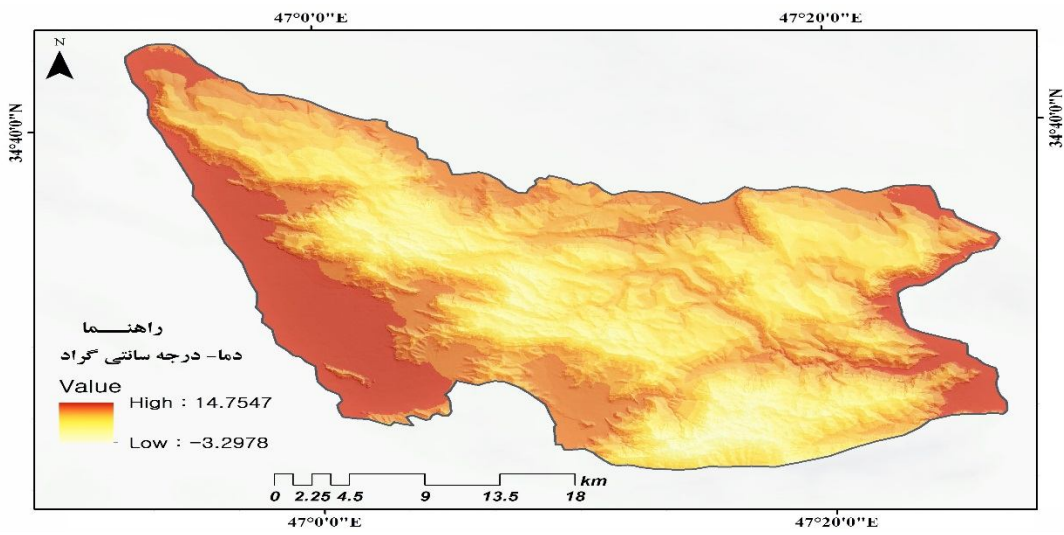
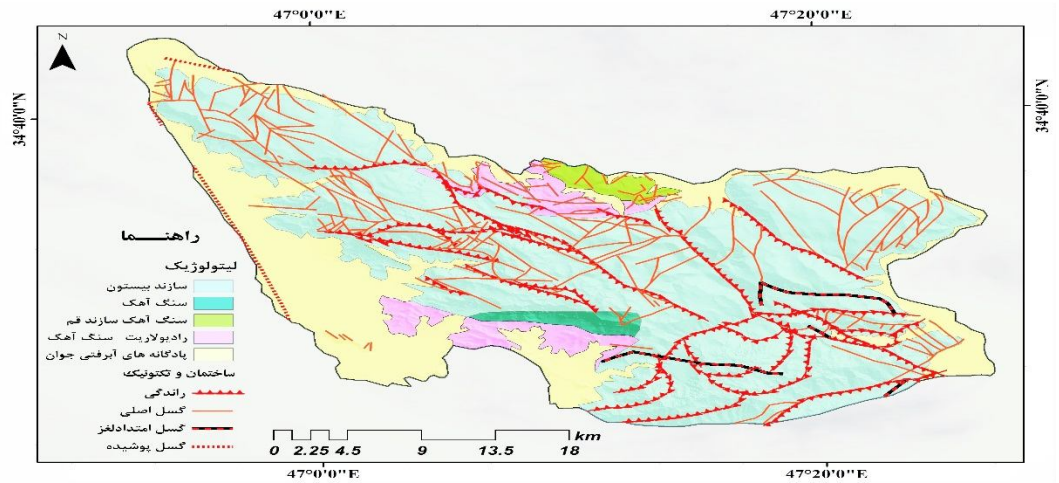
به منظور توسعه کارست سطحی، متغیرهای سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، دما، کاربری اراضی، خاک به عنوان پارامترهای موثر انتخاب گردیدند. هر یک از پارامترهای موثر انتخابی، به عنوان یک مجموعه فازی توسط تابع عضویتی بیان می‌شوند، که این تابع عضویت درجه تعلق اعضای مجموعه را با یک عدد حقیقی بین $[0, 1]$ نشان می‌دهد؛ بنابراین اگر عضویت عنصری در مجموعه A در بازه‌ای از $[0, 1]$ قرار گیرد، به هر x از X عددی در بازه $[0, 1]$ نسبت داده می‌شود، که تابع عضویت نامیده می‌شود. تابع عضویت بصورت $\mu_A(x)$ نشان داده می‌شود که درجه عضویت بین صفر و یک خواهد داشت. تابع عضویت برابر یک نشان‌دهنده عضویت کامل در مجموعه و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم عضویت کامل عنصر در مجموعه است. به منظور پهنه‌بندی توسعه کارست، ابتدا لازم است، تک تک لایه‌ها با توجه به هدف مورد نظر بر اساس توابع عضویت، فازی‌سازی شوند. پارامترهای فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، بارش و دما، با توجه به ماهیت رستری آنها با استفاده از توابع موجود در نسخه ۱۰/۳ نرم افزار ArcGIS و یا کدنویسی در تحلیلگر Raster Calculator فازی‌سازی گردیدند (شکل ۴). تابع عضویت لایه‌های وکتور بر اساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی دارد، تعیین گردیده است. لازم به ذکر است که تابع عضویت تعریف شده برای لایه‌های رستری، تابع خطی^۱ می‌باشد.

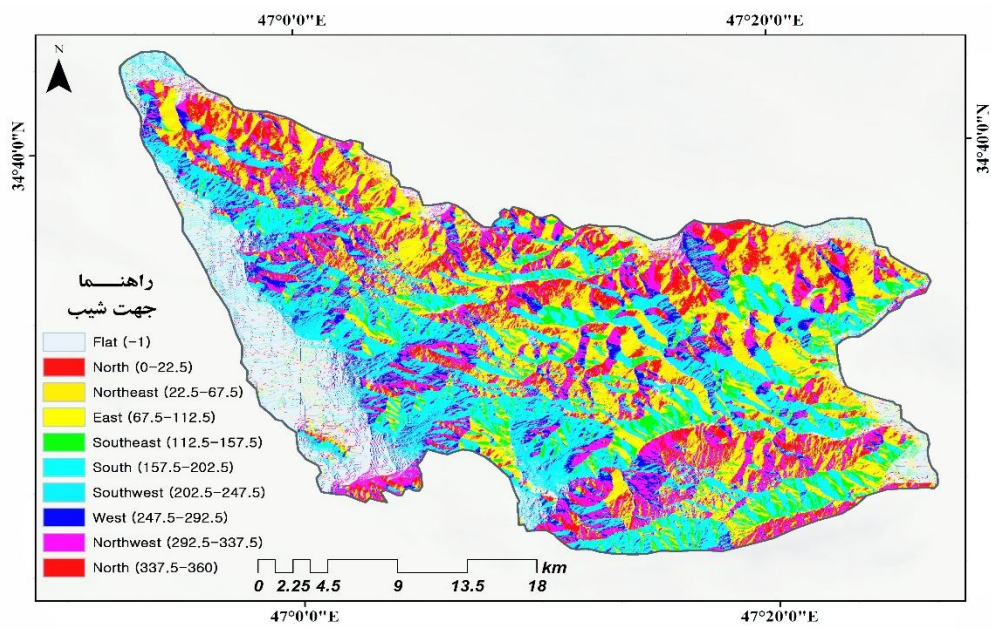
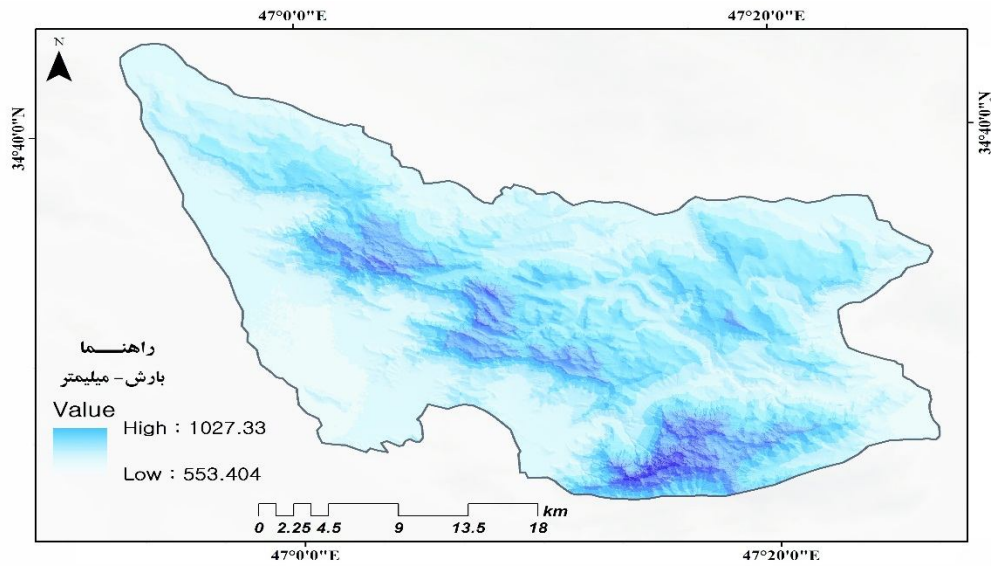
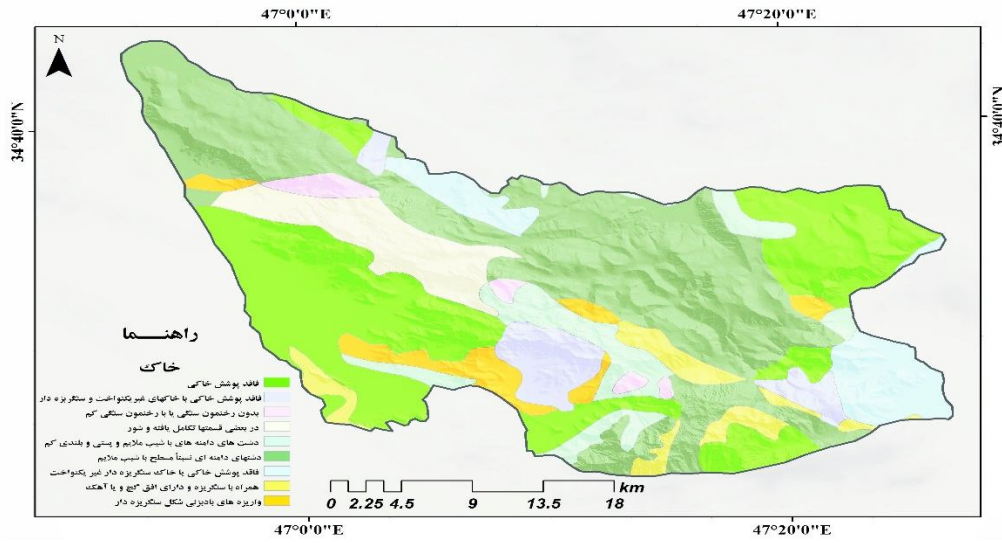
لازم به ذکر است که تابع عضویت تعریف شده برای لایه‌های رستری، تابع خطی^۱ می‌باشد.

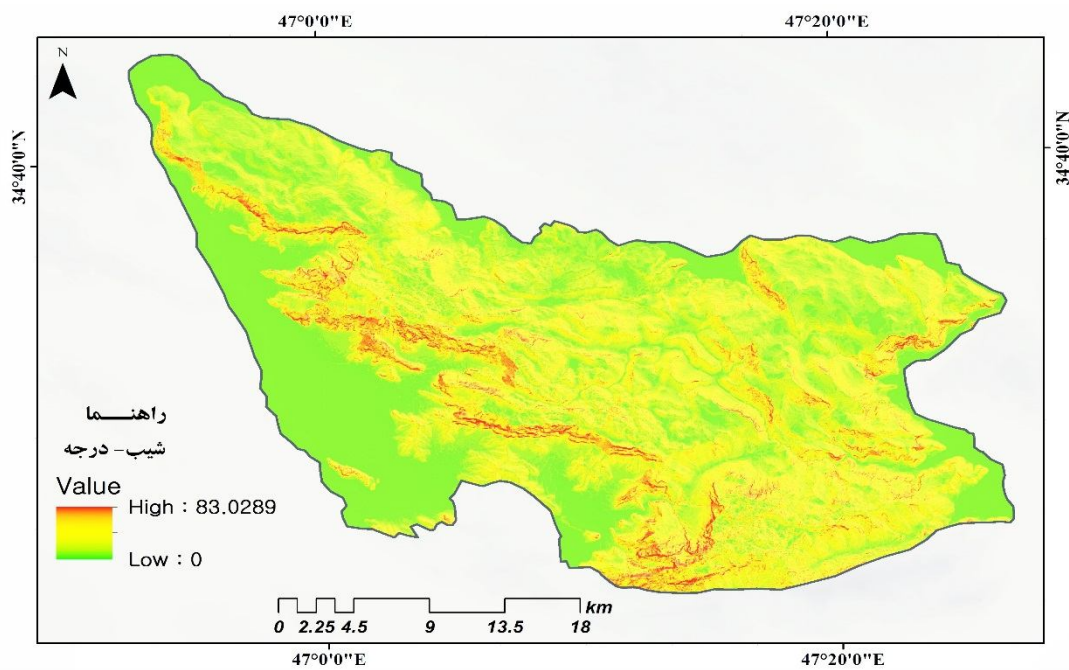
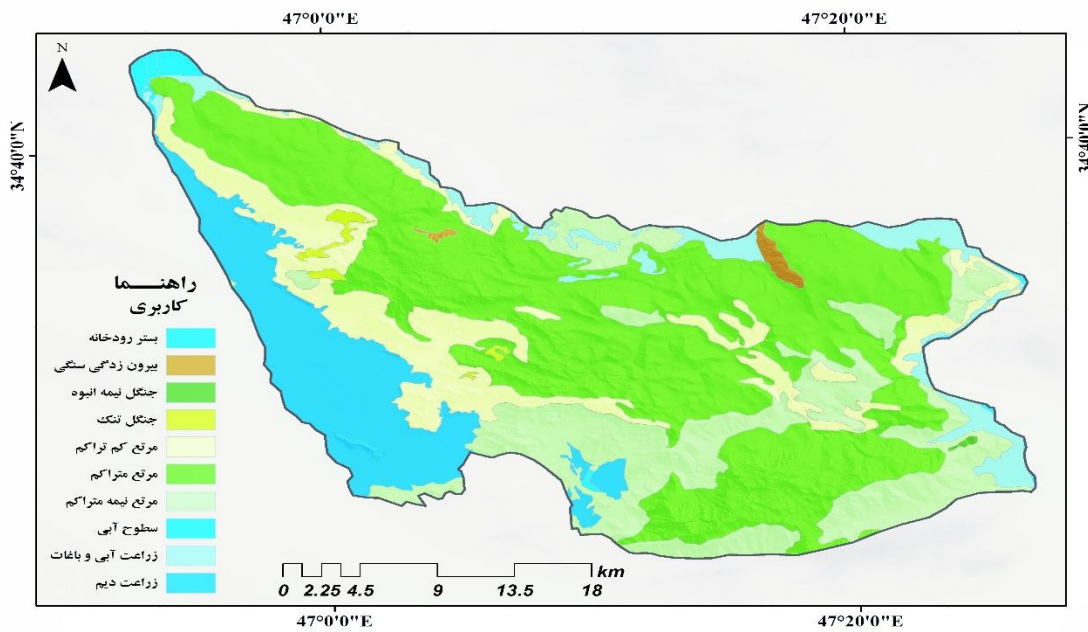
روش تحقیق

قبل از آنکه به بررسی توسعه کارست سطحی در توده بیستون بپردازیم، لازم است به نقش عواملی که به نحوی در این توسعه نقش دارند، اشاره نمود. در مجموع نه عامل، در فرایند کارست‌زایی و توسعه آن در مناطق مورد بررسی دخیل می‌باشند که از میان آنها عوامل زمین‌شناسی (لیتولوژی) و اقلیمی (بارش)، اصلی‌ترین عامل‌ها در شکل‌گیری و توسعه کارست بوده و عدم وجود هر یک از این دو عامل، باعث عدم شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست یا شکل‌گیری بسیار محدود می‌گردد. از آنجایی که ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌های کمیو کیفی آبخوان‌های کارستی و بررسی میزان آسیب‌پذیری آنها، تاثیر بسزایی دارد، تهیه نقشه توسعه یافتگی سطحی کارست، لازم و ضروری می‌باشد. به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، از مدل منطق فازی و عملگر گاما استفاده می‌نماییم. به منظور توسعه کارست سطحی ابتدا نقشه متغیرهای سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، دما، کاربری اراضی، خاک به عنوان پارامترهای موثر، تهیه شد (شکل ۳). به منظور پهنه‌بندی توسعه کارست، ابتدا تک تک لایه‌ها با توجه به هدف مورد نظر بر اساس توابع عضویت، فازی‌سازی شد. پارامترهای فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، بارش و دما، با توجه به ماهیت رستری آنها با استفاده از توابع موجود در نسخه ۱۰/۳ نرم‌افزار ArcGIS و یا کدنویسی در تحلیلگر Raster Calculator فازی‌سازی گردیدند (شکل ۴). تابع عضویت لایه‌های وکتور بر اساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی دارد، تعیین گردیده است. لازم به ذکر است که تابع عضویت تعریف شده برای لایه‌های رستری، تابع خطی^۲ می‌باشد.

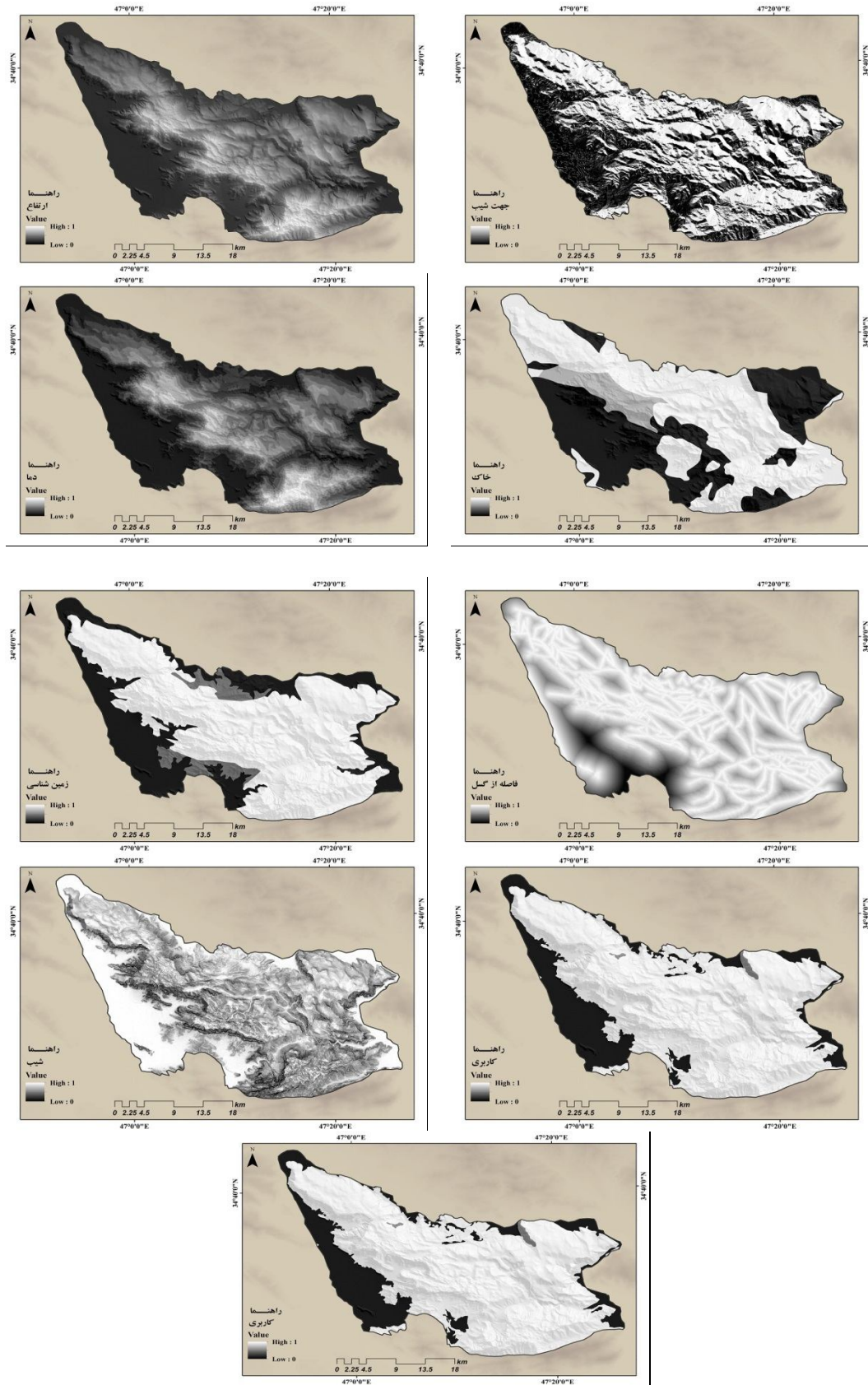
1. Linear
2. Linear







شکل ۳: پارامترهای موثر در توسعه سطحی کارست در توده بیستون



شکل ۴: فازی سازی پارامترهای موثر در توسعه سطحی کارست در توده بیستون

در ادامه به معرفی تابع عضویت این لایه‌ها، پرداخته شده است:

ارتفاع: از آنجایی که با افزایش ارتفاع، شرایط مساعد جهت توسعه کارست به علت کاهش دما و افزایش بارش فراهم شده، فرایند کارست‌زائی فعال‌تر می‌باشد، میان پارامتر ارتفاع و توسعه کارست سطحی رابطه مستقیمی برقرار است. به همین دلیل نیز از یک رابطه خطی افزایشی، جهت تعیین عضویت این لایه در توده مورد بررسی، استفاده شده است (شکل ۵). وجود حد ارتفاعی و اختلاف ارتفاع بسیار بالا در توده مورد بررسی (۳۴۰۰-۱۲۹۶ متر) تاثیر بسیاری بر پارامترهای اقلیمی داشته است.

فاصله از گسل: میان فاصله از گسل و توسعه کارست، رابطه معکوسی وجود دارد؛ زیرا در مناطق نزدیک گسل، به علت تکتونیزه بودن و وجود درزه و شکاف، میزان نفوذپذیری سنگ‌ها بیشتر بوده در نتیجه عمل نفوذ آب و انحلال بیشتر است. با افزایش فاصله از گسل، میزان درزه و شکاف‌ها کاهش یافته در نتیجه نفوذ کمتر شده و میزان کارست‌زائی کاهش می‌یابد، از این‌رو، از یک رابطه خطی کاهنده جهت تعیین عضویت این لایه در توده مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۵). در این ارتباط نیز منطقه به شدت تکتونیزه بوده به خصوص دارای تعداد بالای گسل‌های رانده نیز می‌باشد که در ایجاد درزه و شکاف در منطقه بسیار تاثیرگذار بوده است.

بارش: با افزایش بارش، شرایط توسعه کارست مساعد شده و در نهایت کارست‌زائی افزایش می‌یابد. در نتیجه، رابطه میان بارش و توسعه کارست، مستقیم بوده و از یک رابطه خطی افزایشی جهت تعیین عضویت این لایه استفاده شده است (شکل ۵). تابع عضویت پارامتر بارش را در توده بیستون نشان داده و این پارامتر با استفاده از تابع خطی، فازی‌سازی شده است. با توجه به پارامتر ارتفاع، بارش منطقه با میزان ۱۰۲۷-۵۵۳ میلی‌متر بسیار قابل توجه می‌باشد که در شکل گیری و توسعه کارست بسیار حائز اهمیت است.

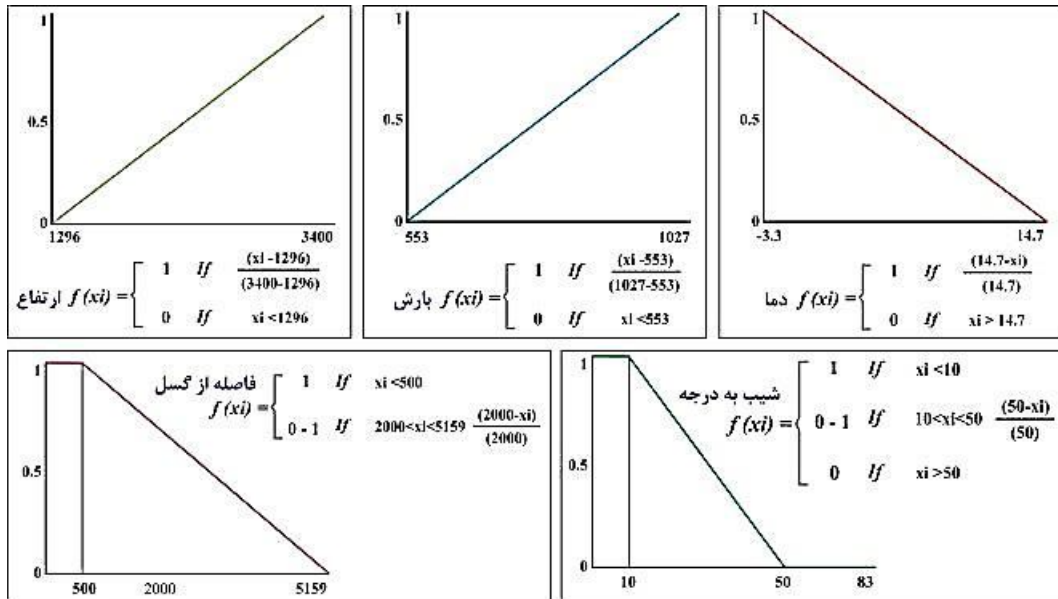
دما: میان پارامتر دما و توسعه کارست، رابطه معکوسی برقرار است، زیرا با کاهش دما، قدرت انحلالی آب افزایش یافته در نتیجه شرایط توسعه

کارست فراهم گردیده و میزان کارست‌زائی افزایش می‌یابد، از این رو از یک رابطه خطی کاهنده جهت تعیین عضویت این لایه استفاده شده است (شکل ۵). این پارامتر نیز با استفاده از تابع Linear، فازی‌سازی شده است. میزان دمای پایین در منطقه خصوصاً در مناطق نسبتاً مرتفع که مناسب برای توسعه کارست می‌باشد شرایط مناسبی را برای این امر فراهم ساخته است (میزان دمای توده مورد بررسی ۳/۳-۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد).

شیب: رابطه میان شیب و توسعه کارست، معکوس است. در شیب‌های کمتر از ۱۰ درجه، بیشترین میزان توسعه کارست را مشاهده می‌نماییم. با افزایش شیب، میزان کارست‌زائی و شرایط توسعه کارست کاهش می‌یابد. از شیب ۵۰ درجه به بالا، توسعه کارست به ندرت انجام می‌گیرد؛ بنابراین تابع عضویت شیب در کارست‌زائی از یک رابطه خطی کاهنده شکسته پیروی می‌کند (شکل ۵). این پارامتر به صورت فرمول نویسی در تحلیل‌گر Raster Calculator فازی‌سازی شده است.

پارامترهای کیفی: لایه‌های سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، خاک و جهت شیب، جزء لایه‌های کیفی می‌باشند. به منظور فازی نمودن این لایه‌ها، با توجه به طبقه‌بندی هر یک از لایه‌ها و عملکردی که در توسعه کارست دارند، امتیازی بین ۰ تا ۲۵۵ به آنها داده شده و سپس با استفاده از معادله ۳ مقادیر اختصاص داده شده، نرمال سازی فازی می‌شوند. پارامتر سنگ‌شناسی به دلیل قرارگیری سازندهای آهکی همچون بیستون، قم و... دارای شرایط مساعد کارست‌زائی می‌باشد. سازند بیستون دارای ضخامت (در حدود ۲۰۰۰ متر) (نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه) و خلوص بالایی بوده (میزان بالای کلسیم و میزان بسیار پایین منیزیم در آزمایشات سنگ‌شناسی منطقه) که این امر شرایط کارست‌زائی منطقه را بسیار مساعد ساخته است؛ همچنین وجود بیش از ۵۰ درصد شیب‌های منطقه در جهات شمالی امکان توسعه بیشتر لندفرم‌های کارستی را فراهم ساخته است.

$$\left\{ \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right\} \quad \text{رابطه (۳)}$$



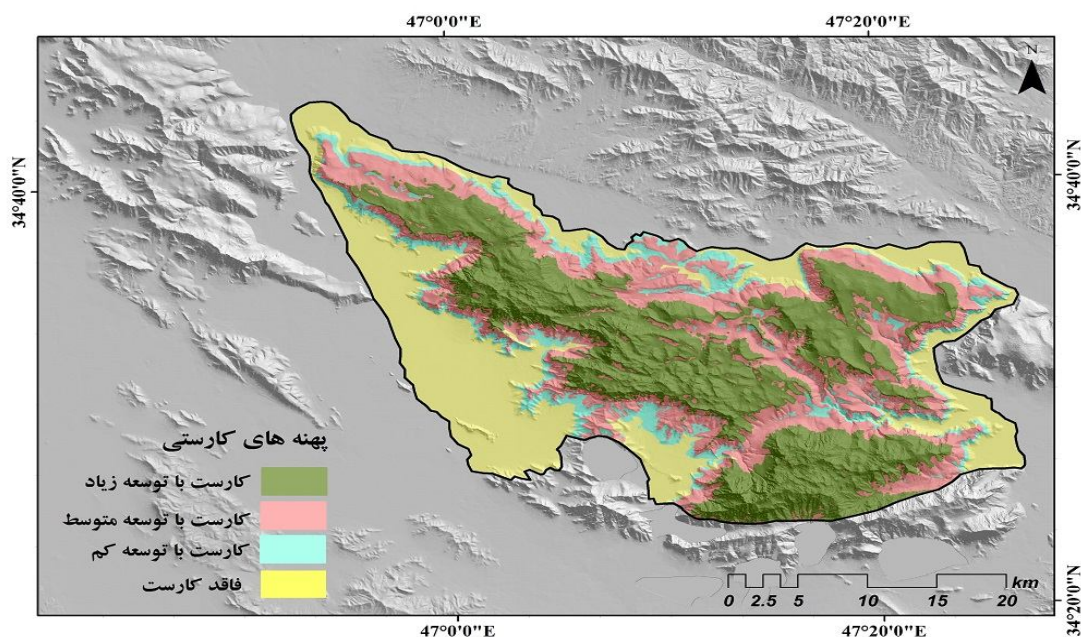
شکل ۵: الگوی توابع فازی عوامل ارتفاع، بارش، دما، فاصله از غسل و شیب

کارست کم، بر حواشی تاقدیس بیستون و کوهپایه‌های آن منطبق است. بخش‌های کمی از آهک بیستون و قم و همچنین رادیولاریت و سیلیس در این طبقه واقع شده‌اند. این طبقه نیز حد ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ متر و بارشی کم در حدود ۷۰۰ میلی‌متر، شیب زیاد، مراتع کم تراکم را در برمی‌گیرد. طبقه با توسعه متوسط کارست با در برگیری ۲۸/۳ درصد از مساحت توده بیستون، در آهک بیستون و بر دامنه‌های تاقدیس بیستون، مناطق باتراکم غسل‌ها و درزه و شکاف‌ها، دامنه‌های رو به آفتاب کوهستان، ارتفاع و بارش زیاد، دمای کم، مراتع نیمه‌متراکم تا متراکم منطبق است. مرتفع‌ترین قسمت‌های تاقدیس بیستون واقع در آهک بیستون، با تراکم بالای درزه و شکاف و غسل‌ها، قرارگیری در هسته بیشینه بارش، قرارگیری در جهت شیب‌های شمال، شمال شرقی و شرقی، پوشش گیاهی به صورت مرتع متراکم، ارتفاع بالا و بارش به صورت برف و دمای بسیار کم در طبقه کارست با توسعه زیاد واقع شده است که ۲۲/۸۷٪ از مساحت توده بیستون را به خود اختصاص داده است (جدول ۱).

از میان پنج عملگر فازی که در قسمت قبل به آنها اشاره گردیده شد، عملگر گاما ۰/۸، به‌عنوان عنوان بهترین ضریب تلفیق روی هم گذاری شناخته و نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست توده مورد مطالعه تهیه گردید. نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی بیستون (شکل ۶) با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی^۱ به چهار کلاس فاقد کارست (۰-۰/۱۳۹)، کارست با توسعه کم (۰/۱۳۹-۰/۳۵۶)، کارست با توسعه متوسط (۰/۳۵۶-۰/۵۵۴) و کارست توسعه یافته (۰/۵۵۴-۰/۹۸۵) طبقه‌بندی شده است. براین‌اساس، طبقه فاقد کارست، منطبق بر سطح دشت‌های شمالی شهر کرمانشاه و دیگر قسمت‌های دشت، نهشته‌های کواترنری و آهک‌های بیوکلاسیک سیلیسی می‌باشد. همچنین، جهت شیب‌های جنوبی، جنوب غربی و غرب، تاثیر کم عامل زمین ساخت و ارتفاع، حداقل بارش و ماندگاری کم آن نسبت به ارتفاعات و پوشش گیاهی کم تراکم و مبتنی بر زراعت و کشاورزی، اصلی‌ترین عوامل در توسعه نیافتگی کارست در این طبقه می‌باشند. این طبقه، بیشترین مساحت توده بیستون را به خود اختصاص داده است. طبقه با توسعه

جدول ۱: مساحت پهنه‌های کارستی مدل فازی در بیستون

طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
فاقد کارست	۳۱۷,۴۷	۳۱,۳۹
کارست با توسعه کم	۱۷۶,۴۸	۱۷,۴۵
کارست با توسعه متوسط	۲۸۶,۲۳	۲۸,۳
کارست با توسعه زیاد	۲۳۱,۳	۲۲,۸۷



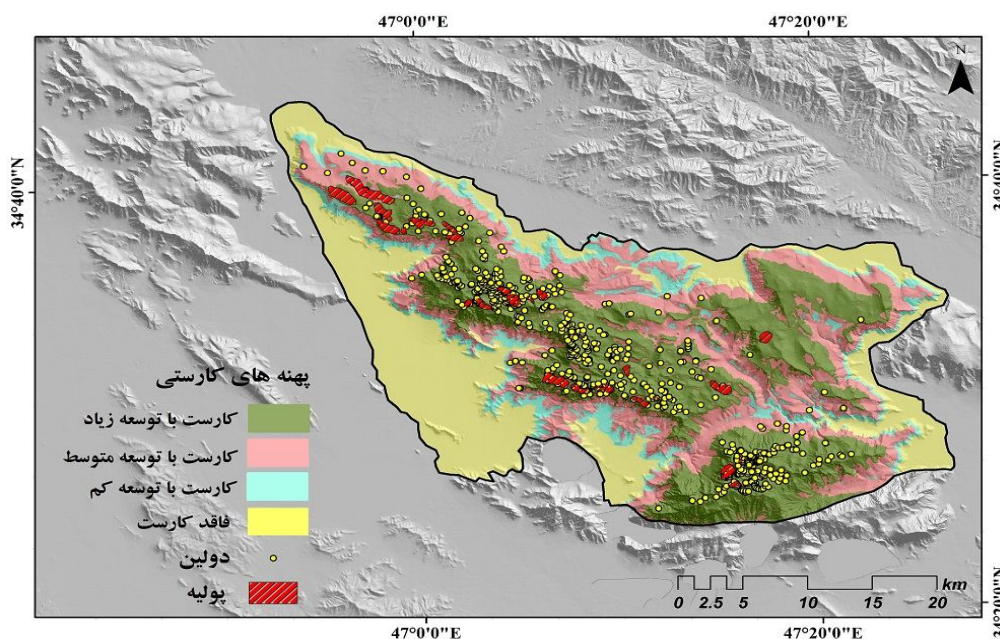
شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی مدل فازی توده بیستون

توده بیستون با پولیه‌های کارستی (شکل ۷)، حاکی از دقت بالای این مدل در ارزیابی توسعه کارست سطحی می‌باشد. از ۲۵ پولیه شناسایی شده در توده مورد مطالعه، ۲۰ پولیه در پهنه کارست با توسعه زیاد، ۵ پولیه در طبقه با توسعه متوسط کارست واقع شده‌اند. همپوشانی لایه فروچاله‌های شناسایی شده در بیستون با نقشه پهنه‌بندی نهایی (شکل ۷) نیز نشان می‌دهد، که در حدود ۷۹٪ از فروچاله‌ها در طبقه کارست توسعه یافته و ۱۶/۴۴٪ از آنها در طبقه کارست توسعه متوسط واقع شده‌اند. قرار گرفتن در حدود ۹۶٪ فروچاله‌ها در این دو طبقه، حاکی از کارایی مطلوب مدل فازی در پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در این توده می‌باشد (جدول ۲).

سازند بیستون و ارتفاعات آن، علاوه بر خلوص سنگ‌شناسیکی و تکتونیزه‌تر بودن، به علت ارتفاع بیشتر، دارای شرایط اقلیمی مساعدتری جهت فرایند کارست‌زایی نسبت به سایر مناطق کربناته آن می‌باشند. پولیه‌های شکل گرفته در توده بیستون، بیشتر از نوع ساختاری بوده و در امتداد گسل‌ها شکل گرفته‌اند. تکتونیزه بودن زون زاگرس مرتفع و خلوص آهک سازند کربناته بیستون، نقش مهمی در توسعه و شکل‌گیری فروچاله و پولیه‌های آن دارد. بیشترین تراکم فروچاله‌ها نیز در توده آهکی بیستون بوده و در سطح دشت‌های منطقه نیز به علت عدم رخنمون سازندهای کربناته، فروچاله شکل نگرفته است. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی

جدول ۲: تعداد و درصد فروچاله‌ها در طبقات توسعه کارست مدل فازی توده بیستون

طبقه	تعداد	درصد
فاقد کارست	۰	۰
کارست کم توسعه	۱۶	۲,۳۲
کارست با توسعه متوسط	۱۱۳	۱۶,۴۴
کارست با توسعه زیاد	۵۴۲	۷۸,۸۹



شکل ۷: پهنه بندی توسعه کارست سطحی مدل فازی و پولیه‌ها و فروچاله‌های استخراج شده در توده بیستون

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مطالعه جریان آب در سیستم کارستی بیستون به لحاظ ویژگی‌های هیدرودینامیکی (هیدرولوژیکی) و هیدروشیمیایی، برآورد میزان شارژ آن و ارزیابی آسیب‌پذیری‌های طبیعی و انسانی آبخوان و چشمه‌های کارستی توده مورد بررسی، تحت تاثیر سیستم کارست سطحی می‌باشد؛ بنابراین بررسی و شناسایی لندفرم‌ها و سیستم کارست سطحی، اهمیت بسزایی دارد. از آنجائی که مدل فازی عموماً در مدل‌سازی مسائلی همچون کارست که با عدم قطعیت همراه هستند، مناسب می‌باشد، از این مدل و عملگر گاما ۰/۸ به‌عنوان بهترین ضریب تلفیق روی هم گذاری به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی بهره گرفته شده است. نه متغیر سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، دما،

کاربری اراضی، خاک به عنوان پارامترهای موثر انتخاب گردیدند و ژئومورفولوژی کارست سطحی با تاکید بر فروچاله‌ها و پولیه‌ها، به عنوان متغیرهای وابسته به منظور ارزیابی کارایی مدل فازی و عملگر گاما مورد استفاده قرار گرفتند. براساس نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی، توده بیستون به چهار طبقه فاقد کارست، کارست با توسعه کم، کارست با توسعه متوسط و کارست توسعه یافته طبقه‌بندی گردیده شده است. بر این اساس، طبقه فاقد کارست، منطبق بر سطح دشت‌های شمالی شهر کرمانشاه و دشت‌های منتهی به رودخانه گاماسیاب و دیگر قسمت دشت‌ها، نهشته‌های کواترنری و آهک‌های بیوکلاسیک سیلیسی می‌باشد. همچنین، جهت شیب‌های جنوبی، جنوب‌غربی و غرب، تاثیر کم عامل زمین ساخت و ارتفاع، حداقل بارش و ماندگاری کم آن نسبت به

- گیلانغرب و خورین در استان کرمانشاه). مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۳): ۱-۱۶.
۳. بهرامی، شهرام؛ زنگنه اسدی، محمدعلی، رهبر، حمزه. ۱۳۹۲. بررسی نقش ژئومورفولوژی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز کنگیر. مجله جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای. دوره ۳ شماره ۷، صفحه ۸۴-۷۱.
۴. حیدری ساربان، وکیل، بهشتی جاوید، ابراهیم؛ فتحی، محمدحسین. ۱۳۹۴. مقایسه دو مدل منطق فازی و (AHP) در ارزیابی و پهنه بندی تناسب زمین برای توسعه فیزیکی شهر با تاکید بر پارامترهای طبیعی (مطالعه موردی: شهرسرعین) مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۶ شماره ۴.
۵. دشتی برمکی، مجید، رضایی، محسن، اشجاری، جواد. ۱۳۹۴. پتانسیل یابی منابع آب کارست کوه‌های دوان و شاپور براساس تصمیم گیری. نشریه پژوهش آب ایران. دوره ۹، شماره ۱.
۶. زروش، واعظی، کریمی، حاجی. ۱۳۹۳. ارزیابی پتانسیل توسعه کارست در تاق‌دیس کبیرکوه استان ایلام با استفاده از تلفیق فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سنجش از دور و GIS. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۳): ۱۴۴-۱۵۷.
۷. سازمان زمین‌شناسی، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کامیاران، میانراهان.
۸. سازمان زمین‌شناسی، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کرمانشاه
۹. سازمان منابع آب کشور (تماب)، داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی، ایستگاه‌های جلوگیری، علیا، روانسر، گوهرچقا، ورله، کلاوه، ارسینج، سنقر، نجوبران
۱۰. سازمان منابع آب کشور (تماب)، داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک روانسر.
۱۱. سازمان نقشه‌برداری کل کشور، مدل ارتفاع رقومی (DEM) توده پرآو- بیستون
۱۲. عباسی، محمد؛ باقری سیدشکری، سجاد، جعفری اقدم، مریم. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از مدل آنتروپی نمونه موردی: تاق‌دیس نوا زاگرس شمال باختری، نشریه علوم زمین (زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست)، سال ۲۴، شماره ۹۴، ص ۱۶۸-۱۶۱.
۱۳. نصیری، بهروز، یارمادی، زهرا، عباس‌نژاد، جواد. ۱۳۹۶. مکانیابی دفن زباله در شهر ماکو به روش فازی و بولین. مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۷(۲۴): ۸۷-۹۸.

ارتفاعات و پوشش گیاهی کم تراکم و مبتنی بر زراعت و کشاورزی، اصلی‌ترین عوامل در توسعه نیافتگی کارست در این طبقه می‌باشند. این طبقه، بیشترین مساحت توده بیستون را به خود اختصاص داده است. طبقه با توسعه کارست کم، بر حواشی تاق‌دیس بیستون و کوهپایه‌های آن منطبق می‌باشد. بخش‌های کمی از آهک بیستون و قم و همچنین رادیولاریت و سیلیس در این طبقه واقع شده‌اند. این طبقه نیز حد ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ متر و بارشی کم در حدود ۷۰۰ میلی‌متر، شیب زیاد، مراتع کم تراکم را در بر می‌گیرد. طبقه با توسعه متوسط کارست، در آهک بیستون و بر دامنه‌های تاق‌دیس بیستون، مناطق با تراکم گسل‌ها و درزه و شکاف‌ها، دامنه‌های رو به آفتاب کوهستان، ارتفاع و بارش زیاد، دمای کم، مراتع نیمه‌متراکم تا متراکم منطبق می‌باشد. مرتفع‌ترین قسمت‌های تاق‌دیس بیستون واقع در آهک بیستون، با تراکم بالای درزه و شکاف و گسل‌ها، قرارگیری در هسته بیشینه بارش، قرارگیری در جهت شیب‌های شمال، شمال شرقی و شرقی، پوشش گیاهی به صورت مرتع متراکم، ارتفاع بالا و بارش به صورت برف و دمای بسیار کم در طبقه کارست با توسعه زیاد واقع شده است. همپوشانی نقشه فروچاله‌ها و پولیه‌های توده بیستون با نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی حاصله از روش فازی نیز حاکی از کارایی مطلوب این مدل در پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در این توده است به طوری که، در حدود ۹۶ درصد از فروچاله‌ها و تمامی پولیه‌های توده مورد بررسی در پهنه کارست با توسعه متوسط و زیاد قرار گرفته‌اند.

منابع

۱. افراسیابیان، احمد. ۱۳۷۷. اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مقالات دومین سمپوزیوم بین المللی، ایران، شیراز.
۲. باقری سید شکری، سجاد؛ یمانی، مجتبی؛ جعفری‌گلو، کریمی، حاجی و مقیمی. ۱۳۹۲. ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی (مطالعه موردی آبخوان‌های کارستی

23. Carter B.G. 1996. Geomorphic information system for geoscientists (modeling for GIS) per admen publication USA. Chapter 9.
24. Elbeih, S.F. 2015. An overview of integrated remote sensing and GIS for groundwater mapping in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1): 1-15.
25. Ford, D., and Williams, P.D. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons.
26. Huggett, R. 2003. Environmental change: the evolving ecosphere. Rutledge.
27. Konkul, J., Rojborwornwittaya, W., and Chotpantararat, S. 2014. Hydro geologic characteristics and groundwater potentiality mapping using potential surface analysis in the Huay Sai area, Phetchaburi province, Thailand. *Geosciences Journal*, 18(1): 89-103.
28. Monroe, W.H. 1970. A glossary of karst terminology (No. 1899-K). US Govt. Print. Off.,
29. Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., and Voudouris, K. 2015. A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Timavos area, Greece. *Journal of Hydrology*, 525: 197-208.
30. PulidoCalvo I., and Gutiérrez Estrada J.C. 2009. Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. *Bio systems Engineering* 102(2): 202-218.
31. Rahmati, O., Pourghasemi, H.R., and Melesse, A.M. 2016. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137: 360-372.
32. Senanayake, I.P., Dissanayake, D.M.D.O.K., Mayadunna, B.B., and Weerasekera, W.L. 2016. An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1): 115-124.
33. Mallast, U., Gloaguen, R., Geyer, S., Rodger, T., and Siebert, C. 2011. Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of
۱۴. ناجی دومیرانی، صادق؛ فخرآبادی پور، فرزانه؛ ساسان پور، فرزانه. ۱۳۹۷. تحلیل پهنه‌های مناسب توسعه اکوتوریسم با استفاده از تلفیق مدل FUZZY – AHP مطالعه موردی: بخش ماهان. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*. ۸(۲۹): ۱۰۶-۹۱.
۱۵. مقصودی، مهران، اخوان، هانیه، مهدیان ماهفروزی، مجتبی، عشورنژاد، غدیر. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در زاگرس جنوبی (مطالعه موردی: حوضه سیف آباد لاغر). *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)*. دوره ۴۷، شماره ۱. ص ۱۲۴-۱۰۵.
۱۶. ملکی، امجد، شوهانی، داود. ۱۳۸۸. پهنه بندی و تحول کارست استان کرمانشاه با استفاده از GIS، مجموعه مقالات کنفرانس بررسی منابع آب استان کرمانشاه، انتشارات چشمه هنر و دانش.
۱۷. ملکی، امجد، محمودی، فرج‌اله. ۱۳۸۰. تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون- پراو (کرمانشاه)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۰، ص ۱۰۶-۹۳.
۱۸. مومنی، منصور. ۱۳۸۹. مباحث نوین تحقیق در عملیات، انتشارات دانشگاه تهران.
۱۹. میرعربی، علی، جمالی، مریم، محمودی سیوند، سیامک، نیرومند، محمدعلی. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی و تعیین میزان توسعه یافتگی کارست حوضه بختگان به روش تحلیل سلسله مراتبی A.H.P، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران.
۲۰. یمانی، مجتبی، شمسی‌پور، علی‌اکبر، جعفری‌اقدم، مریم، باقری سیدشکری، سجاد. ۱۳۹۲. بررسی عوامل موثر در توسعه یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP، استان کرمانشاه پژوهش‌های علوم زمین، سال ۲۲، شماره ۸۸، ص ۵۷ تا ۶۶.
۲۱. یوسفی‌راد، مصطفی، پهنه بندی توسعه یافتگی واحدهای سنگ شناختی به روش AHP. ۱۳۸۸. *مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی*، جلد ۱۹، شماره ۷۳.
۲۲. یوسفی سنگانی، کیوان، محمدزاده، حسین، اکبری، مرتضی. ۱۳۹۳. ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با روش تلفیق فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی مطالعه موردی: شمال خاوری رشته کوه‌های هزارمسجد، استان خراسان رضوی، نشریه منابع آب و توسعه، شماره ۴، ص ۱۲۷ تا ۱۴۱.

36. Weishampel, J.F., Hightower, J.N., Chase, A.F., Chase, D.Z., and Patrick R.A. 2010. Detection and morphologic analysis of potential below-canopy cave openings in the karst landscape around the Maya polity of Caracul using airborne Lid AR. *Journal of Cave and Karst Studies*, 73 (3):187–196.
37. White, W.B. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains* (Vol. 464). New York: Oxford university press.
- lineaments from remote sensing data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15: 2665–2678.
34. Van Alphen, B.J., and Stoorvogel, J.J. 2000. A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5): 1706-1713.
35. VanBeynen, P.E. (Ed.). 2011. *Karst management*. Springer Science & Business Media.

