

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

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

^۱استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد

^۲گروه برنامه‌ریزی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

^۳دانش آموخته دکتری 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، تأثیر 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) 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 بین، 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

2Van Beynen, 2011

3White, 1988

پوشش زمینی، 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 (RF) و حداکثر آنتروپی^۶ (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). کان‌کول^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 به دست آوردند. اوی‌کانومیدیس^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 به دست 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

در زاگرس جنوبی پرداختند؛ همچنین می توان به مطالعات یوسفی راد، 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 لندفرم های کارستی که در این مقاله اشاره شده می پردازیم:

کارن: به شکافها یا حفره های انحلالی در زمین های کارستی (سنگ آهک و دولومیت)، کارن گویند که ممکن است تا چندین متر در امتداد سیستمی از شکاف های مورب و متقاطع در سنگ آهک، توسعه یابند. نواحی و سطوح گسترده ای که در آنها کارنها توسعه یافته اند، کارن فیلد نامیده می شوند (هاگت، ۲۰۰۳). گرایک ها یا کلافت کارنها، مهم ترین عارضه در اغلب مجموعه های کارنی می باشند. آنها، زهکش های اصلی به اپی کارست عمیق تر، یا به فروچاله ها و یا به تخلیه های سطحی نظیر کانال های رودخانه ای هستند. این عوارض در امتداد دسته درزه های اصلی شکل گرفته و با زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به هم برخورد می کنند. غارها، مجاری انحلالی بزرگی می باشند که در محل گسستگی ها، به صورت افقی یا عمودی شکل گرفته و به وسیله معبری با سطح زمین مرتبط می شوند. پولیه، فروافتادگی های ایجاد شده در سنگ های آهکی با کف تقریباً مسطح و محصور می باشد (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). دولین^۴ (سینک هول یا فروچاله) به لندفرم های خاص ایجاد شده بوسیله فرایندهای کارستی گفته می شود، که بوسیله فروافتادگی های مدور با شبکه زهکشی زیرزمینی، مشخص می شوند (تیهانسکی، ۱۹۹۹). در زبان انگلیسی، سینک هول، فروچاله و چاله های بلعنده، واژه های معادل دولین می باشند (هاگت، ۲۰۰۳).

سراب نیلوفر در زاگرس چین خورده 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 پهنه بندی 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 مطالعه ای نقش ژئومورفولوژی در ویژگی های هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه های حوضه آبخیز کنگیر در استان ایلام را مورد بررسی قرار دادند. باقری و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی به ارزیابی ویژگی های هیدروپنماتیکی آبخوان های کارستی با استفاده از آنالیز سری های زمانی در آبخوان های کارستی گیلانغرب و خورین در استان کرمانشاه پرداختند. یوسفی سنگانی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با تلفیق مدل فازی و مدل سلسله مراتبی در شمال شرق کوه های هزار مسجد پرداخته و روش فازی را برای پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی مناسب دانسته اند. 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. بدین منظور لایه های اطلاعاتی سنگ شناسی، چگالی خطواره ها، شیب سطح زمین، بارش، ارتفاع، پوشش گیاهی و تراکم آبراهه ها با استفاده از اطلاعات رقومی سنجش از دور، نقشه های زمین شناسی، نقشه های 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 پهنه بندی تناسب زمین به منظور توسعه فیزیکی شهر با استفاده از پارامترهای طبیعی پرداخته و به کارایی این مدل تاکید داشته اند. مقصودی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از تابع گاما فازی تحت نرم افزار ArcGIS به پهنه بندی شدت انحلال سنگ های کربناته

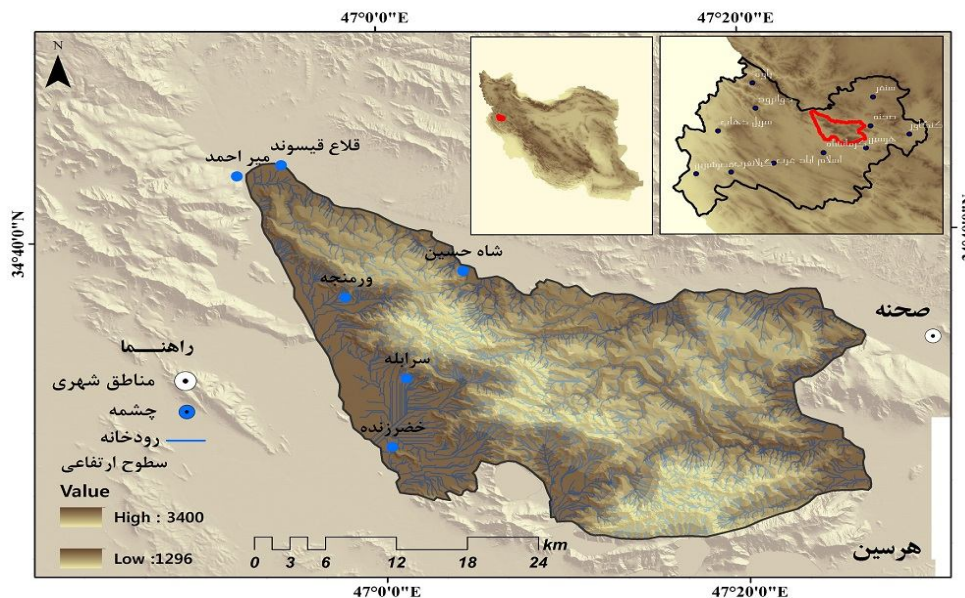
1Huggett, 2003

2Grikes

3Ford, D., & Williams, 2007

4Doline

5Tihanski, 1999



شکل ۱: موقعیت توده آهکی بیستون

بنابراین، هدف از این پژوهش، تاثیر پارامترهای مهم در توسعه یافتگی کارست سطحی منطقه با استفاده از مدل فازی می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

توده آهکی بیستون دارای مساحت ۱۰۱۵ کیلومتر مربع، با روند شمال غربی-جنوب شرقی بین عرض‌های جغرافیایی $25^{\circ} 34'$ 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 وجود آهک ضخیم لایه بیستون، اشکال سطحی توسعه یافته‌ای همچون سینک‌هول (فروچاله)، کارن، کارن فیلد، غار، لایپه، پولیه و... شکل گرفته است

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) 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 منعکس کننده تاثیر شیب و فرایندهای فرسایش می‌باشند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷).

وجود چشمه‌های مهمی چون ورمنجه، سرابله، میراحمد، شاه حسین، خضرزنده 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 تاثیر آن در بیلان آبی منطقه ضروری به نظر می‌رسد؛

- 1 Shaft
- 2 Monroe, 1970

آهکی دوره کرتاسه می‌باشد (شکل ۱).

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



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

زیرزمینی و تعیین مرز حوضه آبریز کارستی، تهیه نقشه فروچاله‌ها، یک پیش‌نیاز اساسی محسوب می‌شود (انجل و همکاران، ۲۰۰۴). 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 کارست‌زایی و توسعه آن و همچنین شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست در منطقه مورد بررسی دخیل می‌باشند. لازم

مواد و روش‌ها

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 ردیابی، به منظور شناخت مسیر جریان آب‌های

1. Angel et al, 2004

و یا نیست و می‌توان برای هر مجموعه A تابع زیر را تعریف کرد (مومنی، ۱۳۸۹).

(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). به دلیل نقش تعدیلی عملگر گاما و نزدیک به واقعیت بودن آن، در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

گاما: عملگر گاما نقش تعدیلی 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 معادله (۲) تعریف می‌شود.

(۲)

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

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

به ذکر است که نقشه کاربری براساس نقشه ۱،۲۵۰،۰۰۰ 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،۱۰۰،۰۰۰ 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). تاثیر عوامل موثر در توسعه کارست، قطعی و صددرصدی 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). 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). در تئوری مجموعه‌های دقیق، اگر یک مجموعه را در نظر بگیریم، هر عضو مجموعه مرجع یا در مجموعه هست

1. Van Alphen and Stoorvogel, 2000

یافته‌های تحقیق

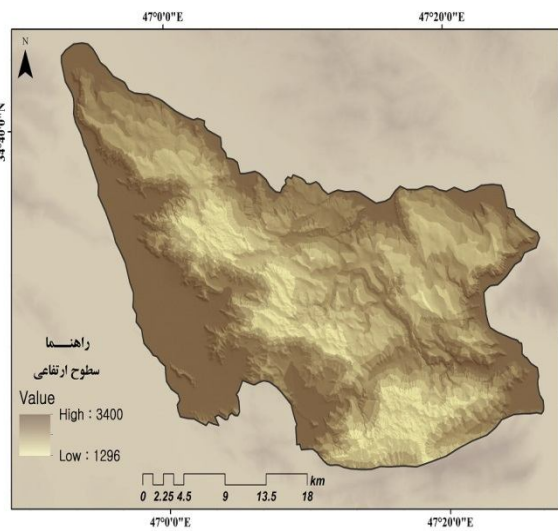
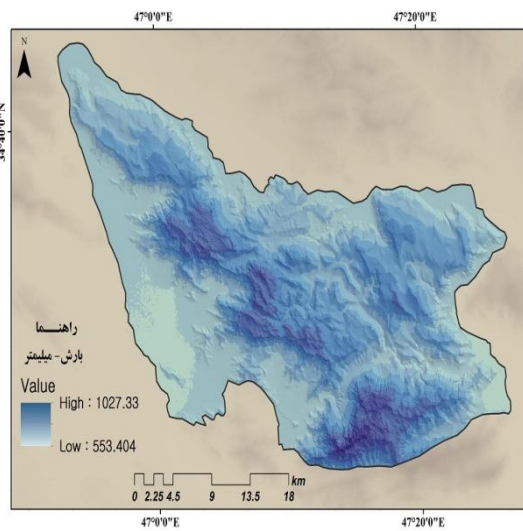
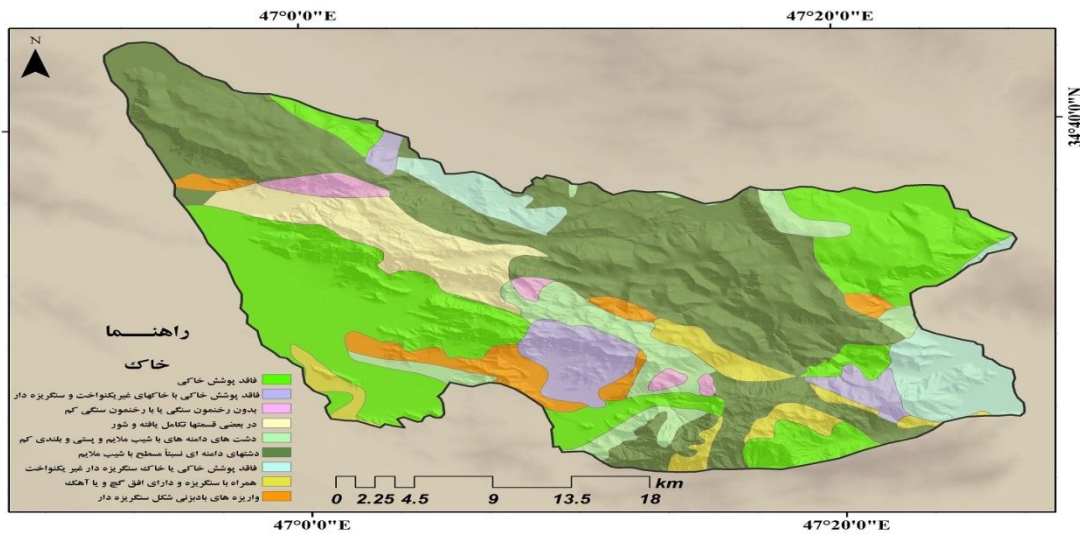
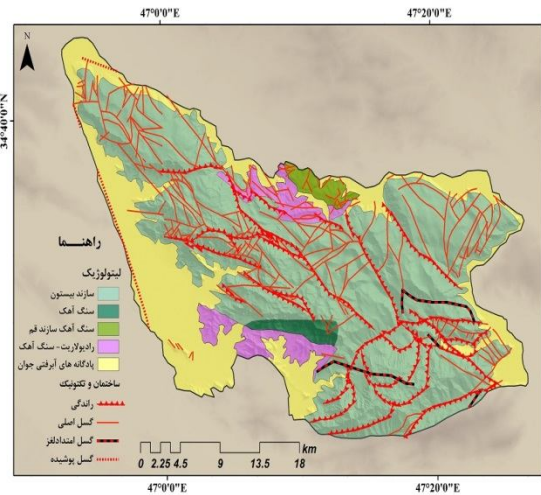
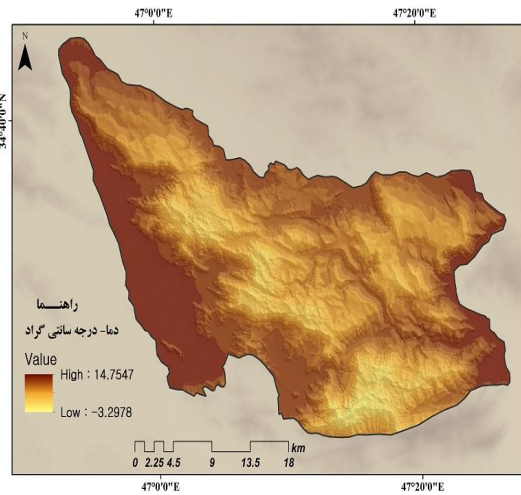
قبل از آنکه به بررسی توسعه کارست سطحی در توده بیستون بپردازیم، لازم است به نقش عواملی که به نحوی در این توسعه نقش دارند، اشاره نمود. در مجموع نه عامل، در فرایند کارست‌زایی و توسعه آن در مناطق مورد بررسی دخیل می‌باشند که از میان آنها عوامل زمین‌شناسی (لیتولوژی) و اقلیمی (بارش)، اصلی‌ترین عامل‌ها در شکل‌گیری 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 تک‌تک 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^۱ می‌باشد.

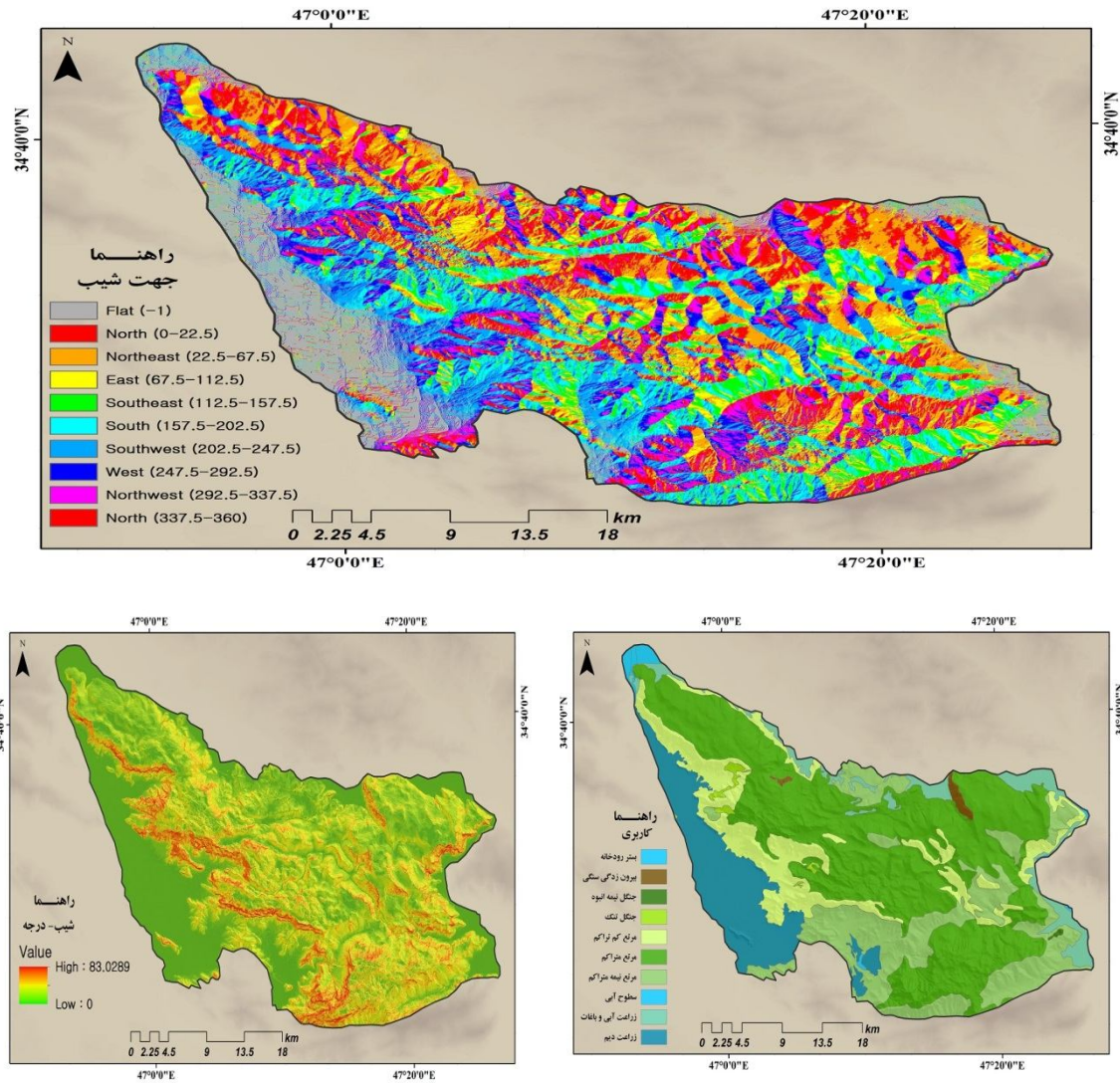
در این رابطه combination لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده صفر و یک است. زمانی که γ را برابر ۱ قرار دهیم، ترکیبی که اعمال می‌شود، همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد ترکیب، برابر با ضرب جبری فازی است. مقدار در نظر گرفته شده برای γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند، که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهشی ضرب جبری فازی، سازگاری دارد (کارتز، ۱۹۹۶).

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 [۰، ۱] نشان می‌دهد؛ بنابراین اگر عضویت عنصری در مجموعه A در بازه‌ای از [۰، ۱] قرار گیرد، به هر x از X عددی در بازه [۰، ۱] 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، تک‌تک 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 نرم‌افزار ArcGIS و یا کدنویسی در تحلیلگر Raster Calculator فازی‌سازی گردیدند. 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.

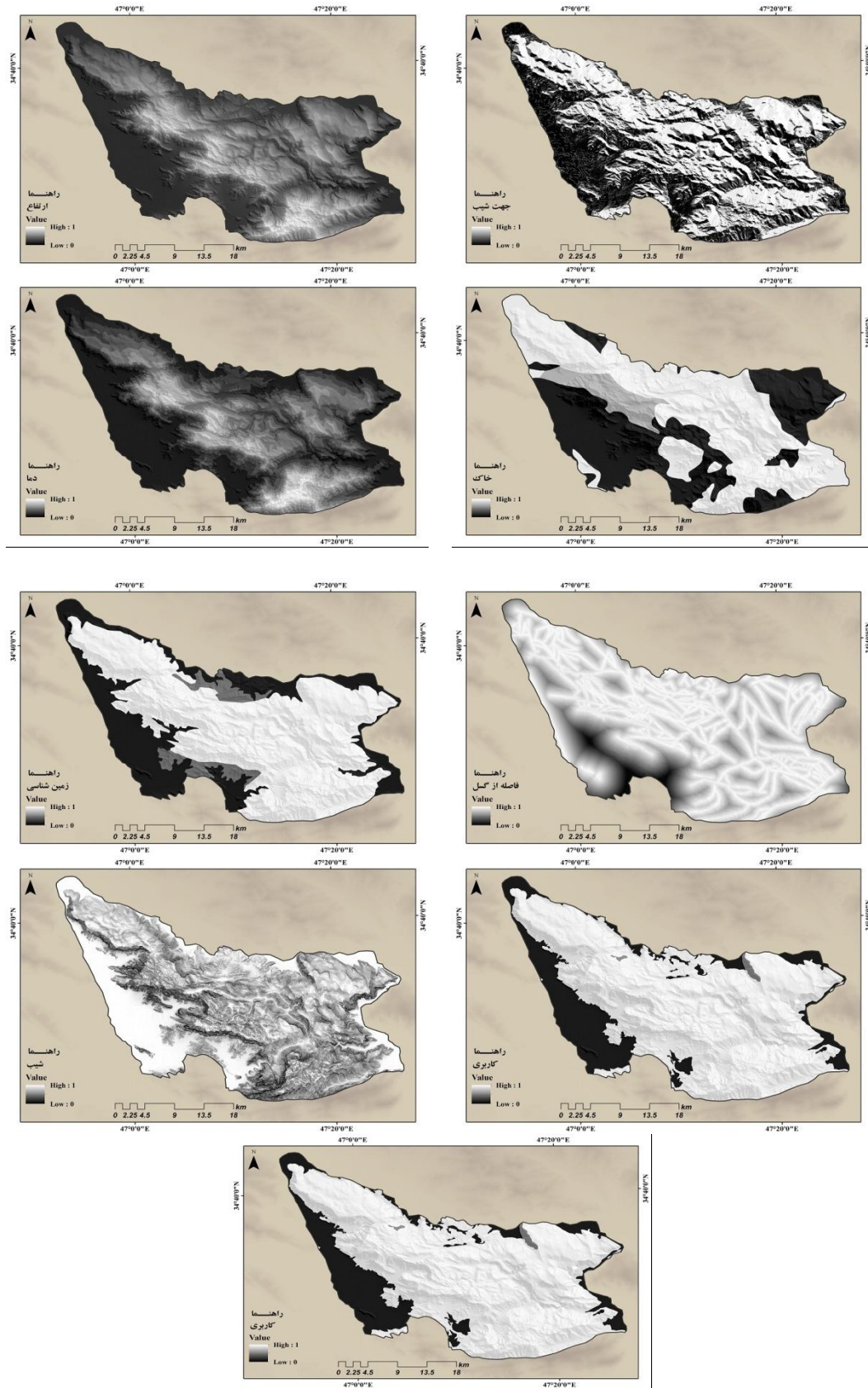
2Linear

1. 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

افزاینده 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، فازی سازی شده است. با توجه به پارامتر ارتفاع، بارش منطقه با میزان ۵۵۳-۱۰۲۷ میلی متر بسیار قابل توجه می باشد که در شکل گیری و توسعه کارست بسیار حائز اهمیت است.

۴. 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 کارست زائی افزایش می یابد، 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، فازی سازی شده است. میزان دمای پایین در منطقه خصوصاً در مناطق نسبتاً مرتفع که مناسب برای توسعه کارست می باشد شرایط مناسبی را برای این امر فراهم ساخته است (میزان دمای توده مورد بررسی ۳/۳-۴/۷ درجه سانتی گراد)

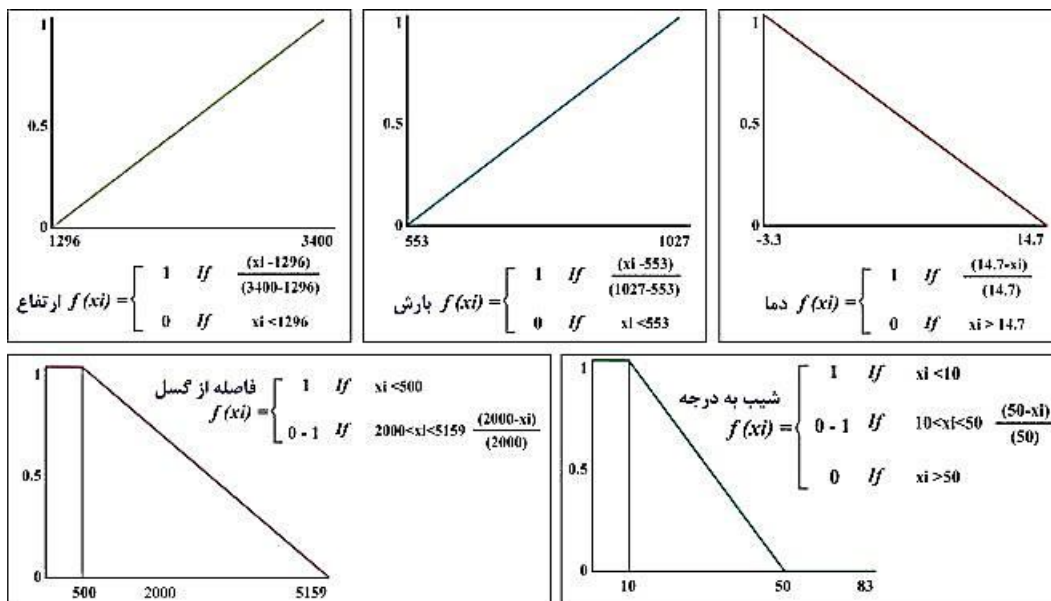
۵. شیب: رابطه میان شیب و توسعه کارست، معکوس است. در شیب های کمتر از ۱۰ درجه، بیشترین میزان توسعه کارست را مشاهده می نماییم. با افزایش شیب، میزان کارست زائی و شرایط توسعه کارست کاهش می یابد. از شیب ۵۰ درجه به بالا، توسعه کارست به ندرت انجام می گیرد؛ بنابراین تابع عضویت شیب در کارست زایی از یک رابطه خطی کاهنده شکسته پیروی می کند (شکل ۵). این پارامتر به صورت فرمول نویسی در تحلیل گر Raster Calculator فازی سازی شده است.

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

۱. ارتفاع: از آنجایی که با افزایش ارتفاع، شرایط مساعد جهت توسعه کارست به علت کاهش دما و افزایش بارش فراهم شده، فرایند کارست زائی فعال تر می باشد، 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 (۱۲۹۶-۳۴۰۰ متر) تاثیر بسیاری بر پارامترهای اقلیمی داشته است.

۲. 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 نفوذ پذیری سنگ ها بیشتر بوده در نتیجه عمل نفوذ آب و انحلال بیشتر است. با افزایش فاصله از گسل، میزان درزه و شکاف ها کاهش یافته در نتیجه نفوذ کمتر شده و میزان کارست زائی کاهش می یابد، از این رو، 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 گسل های رانده نیز می باشد که در ایجاد درزه و شکاف در منطقه بسیار تاثیر گذار بوده است.

۳. بارش: با افزایش بارش، شرایط توسعه کارست مساعد شده و در نهایت کارست زائی افزایش می یابد. در نتیجه، رابطه میان بارش و توسعه کارست، مستقیم بوده و از یک رابطه خطی



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

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 (۰/۳۵۶/۵۵۴-۰/۰) و کارست توسعه یافته (۰/۹۸۵-۰/۵۵۴) طبقه‌بندی شده است. براین اساس، 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 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

۶. 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 کارست‌زایی 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 کارست‌زایی 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.

$$\left\{ \left(\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \right\} \quad (3)$$

از میان پنج عملگر فازی که در قسمت قبل به آنها اشاره گردیده شد، عملگر گاما ۰/۸، به‌عنوان عنوان

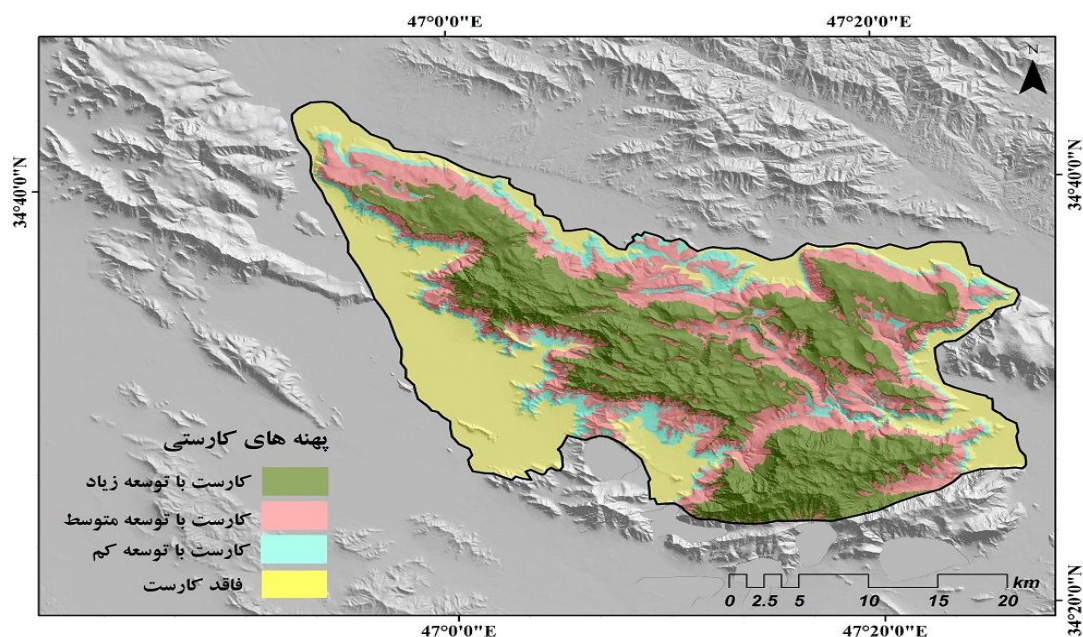
1 Natural Breaks (Jenks)

واقع در آهک بیستون، با تراکم بالای درزه و شکاف و گسل‌ها، قرارگیری در هسته بیشینه بارش، قرارگیری در جهت شیب‌های شمال، شمال‌شرقی 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).

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 با تراکم گسل‌ها 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

جدول ۱: مساحت پهنه‌های کارستی مدل فازی در بیستون

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



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

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 توده بیستون با پولیه‌های کارستی (شکل ۷)، حاکی از

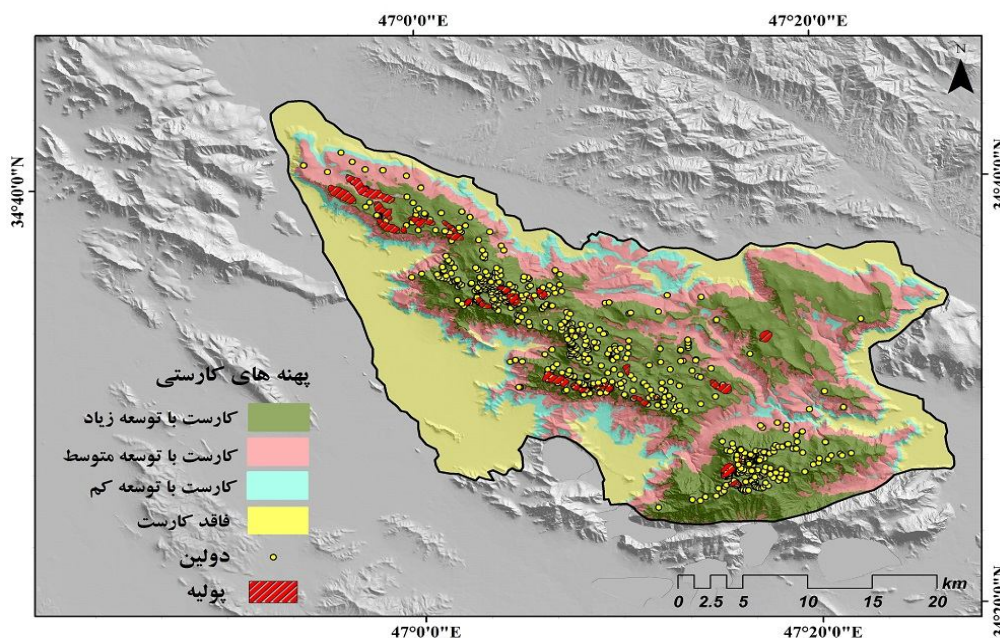
سازند بیستون و ارتفاعات آن، علاوه بر خلوص سنگ‌شناسیکی و تکتونیزه‌تر بودن، به علت ارتفاع بیشتر، دارای شرایط اقلیمی مساعدتری جهت فرایند کارست‌زایی نسبت به سایر مناطق کربناته آن می‌باشند. پولیه‌های شکل گرفته در توده بیستون، بیشتر از نوع ساختاری بوده و در امتداد گسل‌ها شکل گرفته‌اند. تکتونیزه بودن زون زاگرس مرتفع و خلوص

که در حدود ۷۹٪ از فروچاله‌ها در طبقه کارست توسعه یافته و ۱۶/۴۴٪ از آنها در طبقه کارست با 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).

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،

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

مدل سازی 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

بحث 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

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 شگری، سجاد؛ یمانی، مجتبی؛ جعفریگللو، کریمی، حاجی و مقیمی. ۱۳۹۲. ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی (مطالعه موردی آبخوان‌های کارستی گیلانغرب و خورین در استان کرمانشاه). مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲(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. پتانسیل‌یابی منابع آب کارست کوه‌های دوان و شاپور براساس تصمیم‌گیری. 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
- منظور ارزیابی کارایی مدل فازی و عملگر گاما مورد استفاده قرار گرفتند. براساس نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست‌سطحی، 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 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 می‌باشند. 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 کارست‌سطحی حاصله از روش فازی نیز حاکی از کارایی مطلوب این مدل در پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در این توده

۲۰. یمانی، مجتبی، شمسی پور، علی اکبر، جعفری اقدم، مریم، باقری سیدشکری، سجاد. ۱۳۹۲. بررسی عوامل موثر در توسعه یافتگی و پهنه بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP، استان کرمانشاه پژوهش های علوم زمین، سال ۲۲، شماره ۸۸، ص ۵۷ تا ۶۶.
۲۱. یوسفی راد، 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 کوه های هزارمسجد، استان خراسان رضوی، نشریه منابع آب و توسعه، شماره ۴، ص ۱۲۷ تا ۱۴۱.
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 Tirnavos 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.
۹. سازمان منابع آب کشور (تماب)، داده های ایستگاه های باران سنجی و تبخیرسنجی، ایستگاه های جلوگیره علیا، روانسر، گوهرچقا، ورله، کلاوه، ارسینج، سنقر، نجوبران
۱۰. سازمان منابع آب کشور (تماب)، داده های ایستگاه های سینوپتیک روانسر.
۱۱. سازمان نقشه برداری کل کشور، مدل ارتفاع رقومی (DEM) توده پرآو- بیستون
۱۲. عباسی، محمد؛ باقری سیدشکری، سجاد، جعفری اقدم، مریم. ۱۳۹۴. پهنه بندی تحول کارست با استفاده از مدل آنتروپی نمونه موردی: تاقدیس نوا زاگرس شمال باختری، نشریه علوم زمین (زمین شناسی مهندسی و محیط زیست)، سال ۲۴، شماره ۹۴، ص ۱۶۸-۱۶۱.
۱۳. نصیری، بهروز، یارمرادی، زهرا، عباس نژاد، جواد. ۱۳۹۶. مکانیابی دفن زباله در شهر ماکو به روش فازی و بولین. مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۷(۲۴)، ۸۷-۹۸.
۱۴. ناجی دومیرانی، صادق؛ فخرآبادی پور، فرزانه؛ ساسان پور، فرزانه. ۱۳۹۷. تحلیل پهنه های مناسب توسعه اکوتوریسم با استفاده از تلفیق مدل FUZZY - AHP مطالعه موردی: بخش ماهان. مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۸(۲۹): ۹۱-۱۰۶.
۱۵. مقصودی، مهران، اخوان، هانیه، مهدیان ماهفروزی، مجتبی، عشورنژاد، غدیر. ۱۳۹۴. پهنه بندی شدت انحلال سنگ های کربناته در زاگرس جنوبی (مطالعه موردی: حوضه سیف آباد لاغر). پژوهش های جغرافیای طبیعی (پژوهش های 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، فرج اله. ۱۳۸۰. تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری های بیستون- پرآو (کرمانشاه)، پژوهش های 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. پهنه بندی و تعیین میزان توسعه یافتگی کارست حوضه بختگان به روش تحلیل سلسله مراتبی A.H.P، نخستین کنفرانس پژوهش های کاربردی منابع آب ایران.

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.
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.
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 lineaments from remote sensing data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15: 2665–2678.

