پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال سیزدهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳
صص. ۱۹۱-۱۷۶

مقایسه پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی در بخش‌هایی از زاگرس مرتفع و چین‌خورده مطالعه موردی: پرآو–بیستون و کبیرکوه

ساسان زنگنه‌تبار– دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
شیرین محمدخان* – دانشیار گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶ تائید نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

چکیده

فروچاله‌های کارستی به عنوان یکی از مهم‌ترین لندفرم‌های کارستیک نقش بسیار مهمی در تغذیه ابخوان‌های کارستی دارند. عوامل متعددی در سرعت تشکیل و توسعه این اشکال انحلالی دخیل هستند. در این پژوهش به منظور شناسایی نقش عوامل مهم در توسعه فروچاله‌های کارستی، دو توده کارستی پرآو-بیستون (زاگرس مرتفع) و کبیرکوه (زاگرس چین‌خورده) مورد مقایسه قرار گرفته-اند. به منظور تعیین وزن هر لایه مورد مطالعه در پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی از روش AHP اصلاح شده استفاده شده است. نتایج بررسی پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی نشان می‌دهد که ۶۸/۳۵ درصد از توده پرآو-بیستون و ۵۳/۳۳ درصد از توده کبیرکوه دارای پتانسیل متوسط به بالا از نظر توسعه‌یافتگی فروچاله‌ها هستند. نتایج نشان می‌دهد که توده پرآو-بیستون و کبیرکوه از نظر عوامل بارش، ارتفاع، شیب، سنگ‌شناسی و جهت شیب وضعیت تقریبا مشابهی دارند. بیشترین امتیاز برای لایه سنگ‌شناسی، طبقه حاوی آهک ضخیم لایه در هر دو توده می‌باشد. بررسی وضعیت لایه‌های دما، تراکم گسل و پوشش گیاهی بیانگر تفاوت بارز این لایه‌ها است به طوری که توده پرآو-بیستون از نظر دما وضعیت مناسب‌تری برای توسعه فروچاله کارستی دارد. ارتباط مکانی گسل‌ها و پهنه‌های توسعه فروچاله‌های کارستی در توده پرآو-بیستون، بسیار زیاد ولی در توده کبیرکوه، بسیار ضعیف است. پوشش گیاهی در توده کبیرکوه نقش بیشتری در توسعه فروچاله‌های کارستی دارد. در مجموع می‌توان گفت که توده پرآو-بیستون به عنوان بخشی از زاگرس مرتفع، پتانسیل بالاتری در توسعه فروچاله‌های کارستی دارد که مربوط به تراکم بالای گسل و شکستگی آن نسبت به توده کبیرکوه است.

واژگان کلیدی: فروچاله کارستی، AHP اصلاح شده، پرآو-بیستون، کبیرکوه.

* نویسنده مسئول: E-mail: mohamadkh@ut.ac.ir

مقدمه

فروچاله‌ها، گودال‌های ایجاد شده در سطح زمین هستند که به دلیل انحلال سنگ‌های کارستیک به وجود می‌آیند (رسدی و همکاران، ۲۰۱۷). در بین اشکال کارستیک، فروچاله‌ها از اشکال توسعه یافته محسوب می‌شوند که مشاهده آن‌ها سطح بالای توسعه‌یافتگی کارست را نشان می‌دهد و می‌توانند به عنوان مهم‌ترین شاخص‌های لندفرمی کارست در نظر گرفته شوند (پاریزی و همکاران، ۱۳۹۷) که نقش بسیار مهمی در تغذیه آبخوان‌های کارستیک دارند و حتی در بعضی مواقع به عنوان نقاط تخلیه عمل می‌کنند. فروچاله‌ها به وسیله فرایندهای مختلفی شکل می گیرند که شامل ۱. فروچاله‌های انحلالی و فروچاله‌های فروریزشی که در کارست‌های برهنه به وجود می‌آیند؛ ۲. فروچاله‌های ریزشی و پرشده که در کارست‌های پوششی ایجاد می‌شوند و ۳. فروچاله‌های فرونشینی–تراکمی که در کارست‌های مدفون تشکیل می‌شوند (پرین و همکاران، ۲۰۱۵). عوامل موثر و لازم برای ایجاد و توسعه اشکال فروچاله‌های کارستی به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و وضعیت هیدروژئولوژیکی تقسیم می‌شوند (وایت، ۱۹۸۸). تحول و توسعه کارست تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار دارد که در این میان نقش ترکیب سنگی و ویژگی‌های آن و عوامل ساختاری همچون گسل‌ها و درزه‌ها اهمیت زیادی دارد (فورد و ویلیام، ۱۹۸۹). وجود درز و شکافهای زمین‌ساختی همراه با فعالیت‌های انحلالی شرایط را برای نفوذ آب به صورت متلاطم در راستای ژرفا و قرارگیری بیشتر سنگ‌ها (در واحد سطح) در معرض عامل انحلالی فراهم می‌کند (وردنجانی، ۱۳۸۹).

در زمینه بررسی نقش عوامل موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی، تحقیقاتی صورت گرفته است که عنوان برخی از تحقیقات و نتایج حاصل از آن‌ها در زیر اورده شده است:

ازرسکی و فرومکین (۲۰۱۳)، در تحقیقی به بررسی نقش عوامل محیطی در تشکیل فروچاله‌های کارستی نمکی در امتداد دریای مرده پرداختند و دریافتند که دو عامل گسل های فعال نوزمین ساخت و جبهه انحلال حاشیه لایه نمکی علت تشکیل فروچاله‌ها در کارست‌های نمکی هستند. ازدمیر (۲۰۱۵)، تحقیقی را در فلات اوبروک بر روی عوامل موثر در تشکیل فروچاله‌ها انجام داد و دریافت که در شکل گیری و توزیع فروچاله‌ها عوامل زمین‌شناسی، ارتفاع، جهت‌شیب، تراکم گسل، فاصله از گسل و شیب سطح آب زیرزمینی نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند. نام و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی اقدام به شناسایی عوامل کلیدی ایجاد فروچاله‌های کارستی در شرق فلوریدا مرکزی کردند و عوامل اختلاف سطح آب، نفوذپذیری خاک، ضخامت سیستم‌های آبخوان، و نزدیکی به سایر ویژگی‌های کارستی (به عنوان مثال، فروچاله‌های موجود) به عنوان مهمترین عوامل در تشکیل فروچاله‌ها شناخته شد. تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره نشان داد که ضخامت سیستم آبخوان سطحی مهم ترین عامل است و سپس اختلاف سطح آب و نزدیکی به ویژگی‌های کارستی در رتبه‌های بعدی قرار دارند. قربانی و همکاران (۱۳۸۹)، در مقاله‌ای اقدام به بررسی نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی ناهمواری شاهو کردند و دریافتند که در دوره‌های سرد پلئیستوسن از ارتفاع ۱۸۰۰ متر (مرز برف دائمی) به بالا، شرایط برای توسعه انحلالی فروچاله‌های کارستی فراهم بوده است. در چنین شرایطی دولین‌های کارستی دارای نقش دوگانه سیرک ـ دولین بوده‌اند و در ابعاد وسیع شکل گرفته‌اند. همچنین دریافتند که در شرایط اقلیمی کنونی، کارست‌های منطقه تحت تأثیر تخریب شدید مکانیکی قرار دارند. جعفربیگلو و همکاران (۱۳۹۰)، در مقاله‌ای با عنوان «استفاده از DEM در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پرآو ـ بیستون» اقدام به شناسایی و بررسی وضعیت فروچاله‌های کارستی کردند و دریافتند که در توده پرآو–بیستون اشکال اگزوکارست در فرم‌ها و ابعاد مختلف توسعه یافته و تیپیک‌ترین این اشکال یعنی فروچاله‌ها در امتداد درزه‌ها و گسل‌های کششی ناحیه قرار گرفته و فروچاله‌های مستخرج از DEM نیز نشان‌دهنده چنین امتداد و روندی است. فدایی و همکاران (۱۳۹۹)، در تحقیقی با استفاده از مدل DANP اقدام به شناسایی مناطق مستعد فروچاله‌های کارستیک در توده پرآو–بیستون کردند و دریافتند که پوشش گیاهی، ارتفاع و سنگ شناسی به ترتیب با ارزش ۲۲/۵۹، ۱۲/۱۲ و ۱۱/۹۴ درصد مهمترین عوامل دخیل در تشکیل فروچاله ها هستند. غلام حیدری و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از مدل فازی اقدام به بررسی عوامل مؤثر در تکامل فروچاله‌های کارستیک

در سازند گچساران در دشت مارون کهگیلویه و بویراحمد کردند و دریافتند که ۵۵/۲ درصد از منطقهٔ پژوهش با توجه به اینکه در محدودهٔ سازند گچساران قرار ندارد و فاقد لایه‌های گچی است، ازنظر وقوع فروچاله در محدوده ریسک صفر، ۱۱/۲ درصددر محدوده ریسک زیاد، ۱۸/۵ درصد در محدوده ریسک متوسط و ۱۵/۱ درصد در محدوده ریسک کم قرار می‌گیرد. براساس بازدیدهای میدانی و بررسی نقشهٔ پهنه‌بندی، عوامل اصلی مؤثر بر تکامل کارست این منطقه، شیب و خطوط آبراهه است.

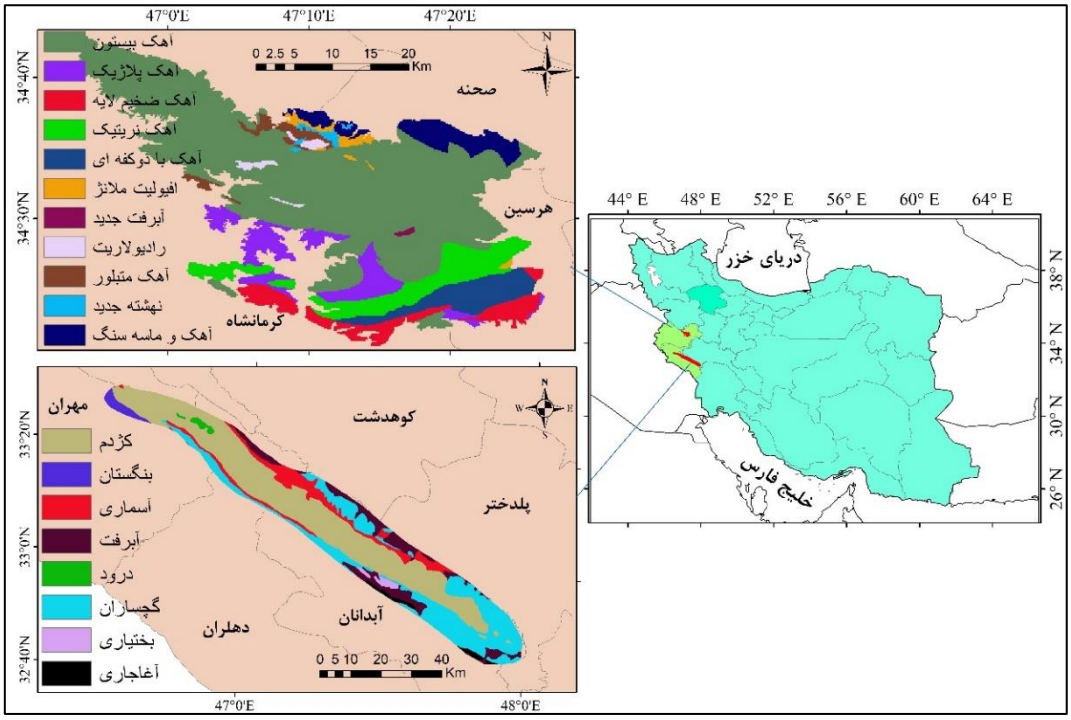
تفاوت بارز تحقیق حاضر با تحقیقات ذکر شده در این است که در آن، دو توده‌ی زاگرس چین‌خورده و زاگرس مرتفع از نظر عوامل موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. به همین منظور توده کارستی پرآو–بیستون از زاگرس مرتفع و توده کارستی کبیرکوه از زاگرس چین‌خورده انتخاب شدند و عوامل موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی در این مناطق مورد بررسی قرار گرفتند. مراحل زمین‌ساختاری و نقش عوامل تکتونیکی متفاوت باعث ناهمگونی در شکل و ساختار چین‌ها و وضعیت لایه‌بندی در دو بخش از رشته کوه زاگرس (چین‌خورده و مرتفع) شده است. نکته دیگر این تحقیق استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی اصلاح شده می‌باشد. در زاگرس چین‌خورده بیشتر شاهد چین‌های منظم هستیم و در زاگرس رورانده، شکل غالب دارای راندگی‌های زیاد و بی‌نظمی در لایه‌ها است (علایی طالقانی، ۱۳۸۶) و همین امر، شرایط متفاوتی را برای توسعه فروچاله‌های کارستی فراهم کرده‌اند که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

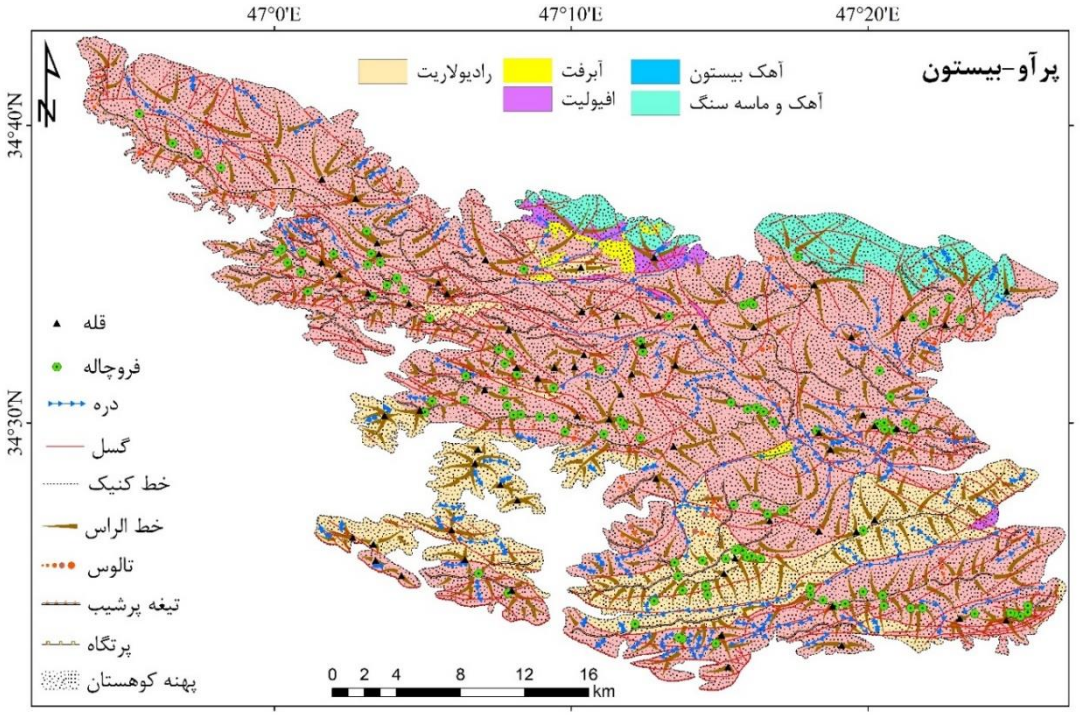
توده کوهستانی پرآو–بیستون از نظر تقسیمات سیاسی بین شهرستان‌های کرمانشاه، صحنه و هرسین قرار دارد. این توده با روند شمال‌غربی–جنوب شرقی جزئی از زون زاگرس مرتفع است و بخشی از آن در زون دگرگون شده سنندج–سیرجان قرار می‌گیرد. مساحت آن ۹۳۰/۵ کیلومتر مربع می‌باشد. سنگ‌های آهکی بیستون و رادیولاریت‌های کرمانشاه به ترتیب ۷۴ و ۲۰ درصد منطقه را تشکیل می دهند. کهن‌ترین بخش آهک‌های بیستون، شامل آهک‌های ستبر لایه در زیر و آهک‌های توده‌ای ریفی در بالا به ضخامت حدود ۳۰۰ متر است که دیرینه تریاس بالا دارد (براود، ۱۹۸۹). رادیولاریت‌ها شامل رادیولاریت‌هایی با نسبتی از گل‌سنگ، آهک سیلیس‌دار، طبقاتی از چرت رادیولاریتی و سنگ رس‌دار و آهک‌های بیوکلاستیک است.

توده کارستی کبیرکوه از لحاظ تکتونیکی بر اساس تقسیم‌بندی اشتوکلین (۱۹۶۸)، در ناحیه زاگرس چین‌خورده واقع شده است. این توده با روند شمال‌غربی–جنوب شرقی از نزدیکی شهر ایلام تا مرز استان خوزستان به طول ۱۶۲ کیلومتر امتداد دارد. مساحت آن حدود ۲۵۳۰ کیلومترمربع است. بیشترین ارتفاع این توده ۲۷۹۰ متر است. سازندهای قابل مشاهده در این محدوده شامل سازندهای کژدم، بنگستان، آسماری، درود، آغاجاری، بختیاری و گچساران می‌باشد و بخش‌هایی از شرق و غرب منطقه نیز توسط نهشته‌های آبرفتی پوشیده شده است. بیشترین مساحت توده کارستی کبیرکوه به ترتیب توسط سازندهای کژدم، گچساران و آسماری پوشیده شده است. سازند آسماری از آهک‌های کرم رنگ، قهوه‌ای و در بعضی نقاط از دولومیت‌های خاکستری کرم و قهوه‌ای رنگ تشکیل شده است. سازند گچساران، شامل رسوبات گچی، نمک و مارن‌های قرمز رنگ است. سازند کژدم نیز شامل مارن، آهک رسی و شیل است. شکل ۱، موقعیت آبخوان‌های پرآو–بیستون و کبیرکوه را نشان می‌دهد. نقشه ژئومورفولوژی دو توده کارستی مورد مطالعه در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شده و در شکل‌های ۲ (پرآو–بیستون) و ۳ (کبیرکوه) آورده شده است. ژئومورفولوژی توده پرآو–بیستون ترکیبی از دیواره‌های رورانده، تیغه‌ها و پرتگاه‌های ساختمانی است که به شدت شکسته و گسل خورده می‌باشند. در راس این توده هر جا که شیب کم و غالبا کمتر از ۴۰ درجه است فروچاله‌های کارستی گسترش یافته و با تراکم بالا ظاهر شده و گاهی تشکیل اووالا داده‌اند. ژئومورفولوژی کبیرکوه بیانگر یک تاقدیس فرسایش یافته با محور شمال‌غربی–جنوب‌شرقی است. در راس این تاقدیس دره طولی شکل گرفته است که اتصال یال‌ها را در راس توده قطع کرده است. در روی یال‌های این تاقدیس، دره‌های یالی

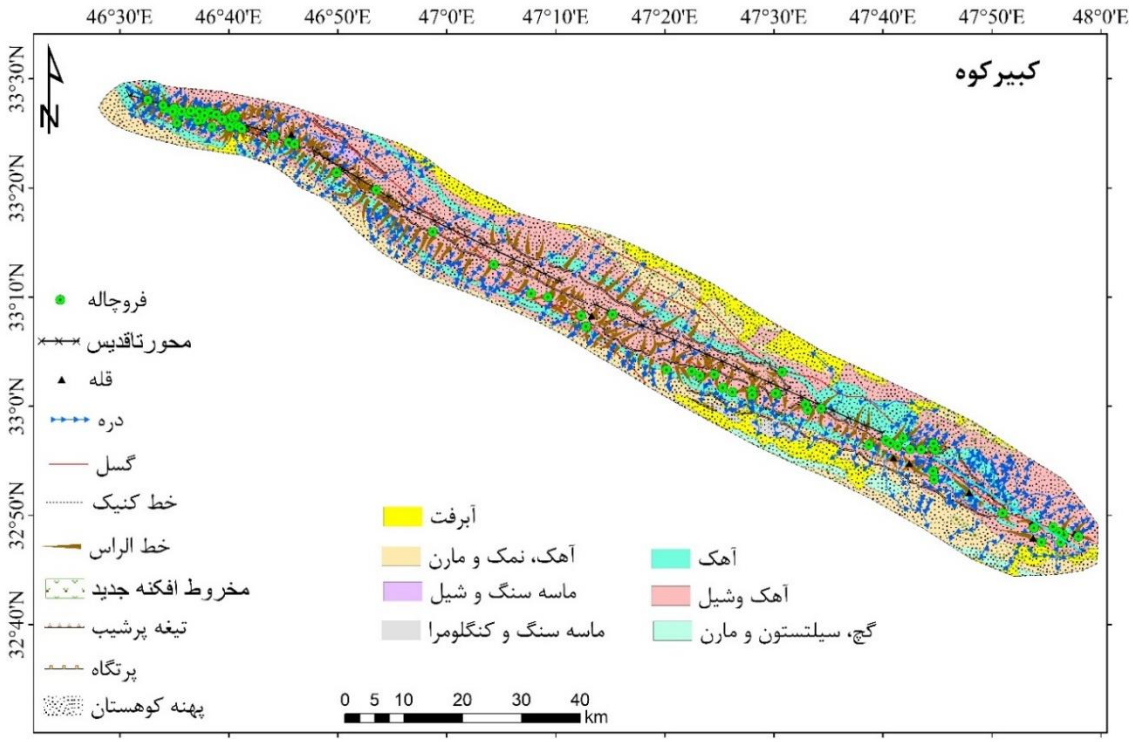
(روز) فراوانی شکل گرفته‌اند و ژئومورفولوژی غالب ترکیبی از یال و دره‌های میانی فرسایش‌یافته می‌باشد. تعداد فروچاله‌های شناسایی شده این توده نسبت به پرآو-بیستون کمتر و غالبا در قسمت‌های کم‌شیب مرتفع قرار دارند.



شکل۱: موقعیت جغرافیایی توده‌های کارستی پرآو-بیستون و کبیرکوه.



شکل ۲: نقشه ژئومورفولوژی توده کارستی پرآو-بیستون.



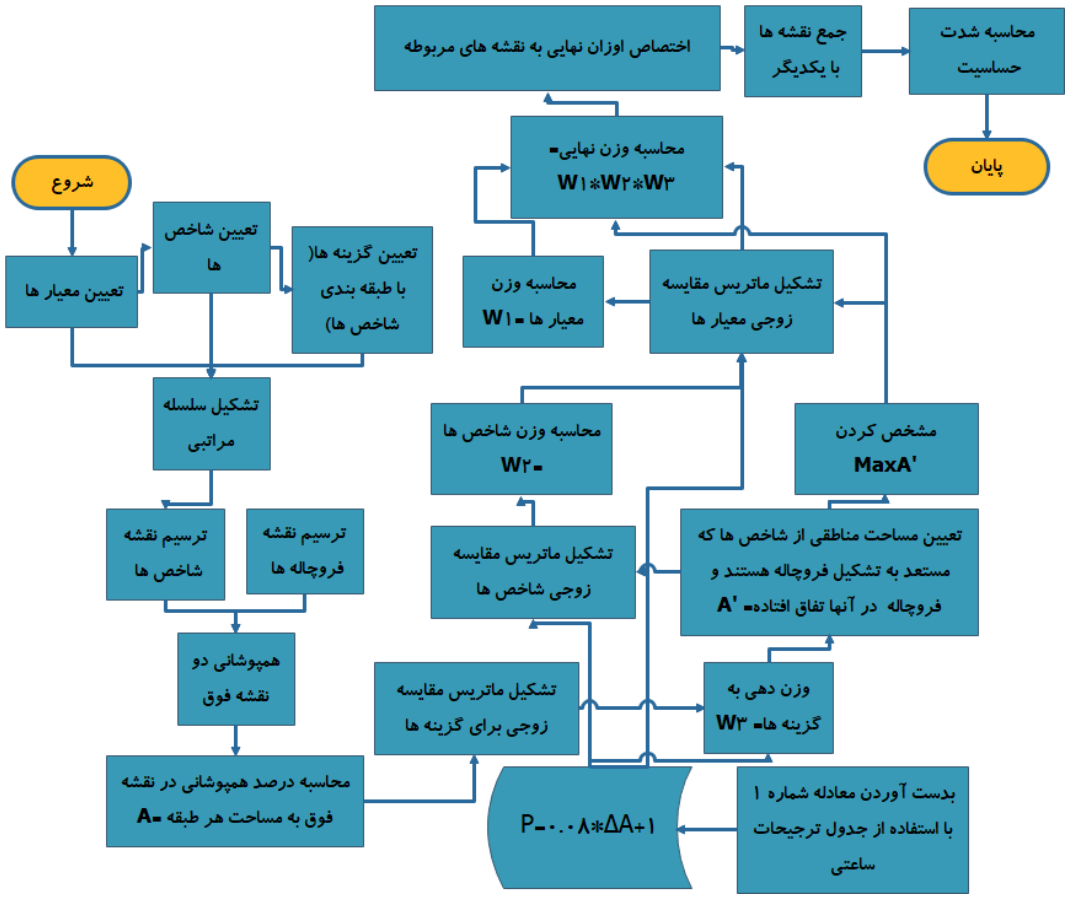
شکل ۳: نقشه ژئومورفولوژی توده کارستی کبیرکوه.

روش تحقیق

این کار یک پژوهش توسعه‌ای–کاربردی است که بر روش‌های کتابخانه‌ای و ابزاری متکی است. داده‌های اصلی پژوهش، نقشه‌های توپوگرافی استان کرمانشاه و ایلام با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی کرمانشاه، کامیاران و میانراهان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور) برای تهیه لایه‌های سنگ‌شناسی و گسل‌های توده کارستی پرآو–بیستون و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ایلام و کبیرکوه (سازمان زمین‌شناسی کشور) برای تهیه لایه سنگ‌شناسی و گسل‌های تاقدیس کبیرکوه، لایه کاربری اراضی استان کرمانشاه و ایلام با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (سازمان منابع طبیعی کشور)، لایه ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر (سازمان فضایی آمریکا) برای تهیه لایه ارتفاع، شیب و جهت شیب، آمار بارش و دمای دو استان کرمانشاه و ایلام (سازمان هواشناسی کشور) برای تهیه لایه بارش و دمای منطقه‌های مورد مطالعه می‌باشد. در این پژوهش از ۸ متغیر سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، بارش، دما، شیب، ارتفاع، جهت شیب و پوشش گیاهی به منظور تعیین پتانسیل توسعه کارست در دو توده کارستی پرآو–بیستون و کبیرکوه استفاده شد. لندفرم‌های کارستی نیز در طی عملیات میدانی شناسایی شد. به منظور آماده‌سازی و تهیه لایه‌های مورد نیاز و همچنین تهیه نقشه هر کدام از لایه‌ها از نرم‌افزار Arc GIS 10.7 استفاده شد. در این پژوهش با توجه به نیاز به لایه‌ی فروچاله‌ها، برای امتیازدهی به طبقات هر لایه با استفاده از روش Fill sink (Lindsay, 2015) اقدام به شناسایی فروچاله‌های کارستی و تهیه نقشه توزیع فضایی آن‌ها می‌گردد. برای این منظور از لایه ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۰ متر برگرفته از سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد. ابتدا این لایه به محیط نرم‌افزار ArcGIS فراخوانی می‌شود و سپس با استفاده از روش Fill sink که دستور آن در ابزار Arc hydro تعبیه شده است اقدام به تهیه لایه فروچاله‌های منطقه مورد مطالعه می‌شود.

برای تهیه نقشه پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی هر کدام از مناطق مورد مطالعه، از روش AHP اصلاح شده استفاده شد (شکل ۴). برای این منظور ابتدا هر طبقه از لایه‌های مورد مطالعه را براساس تعداد فروچاله‌های شناسایی شده در آن

طبقه، امتیازبندی (جدول۱) و سپس با تشکیل ماتریس داده‌ها اقدام به مقایسه زوجی امتیاز طبقات هر معیار نسبت به هم شد. به شکلی که امتیاز سایر طبقات منهای امتیاز طبقه معیار می‌شود و در نتیجه قطر ماتریس مساوی با صفر می‌گردد (جدول ۲). در مرحله بعد فرمول P = 0.08*A + 1 (محمدخان، ۱۳۸۹) را بر اعداد مثبت هر خانه از ماتریس قبلی اعمال می‌شود و اعداد منفی را متناسب با خانه نظیر خود در جدول معکوس می‌کنیم (جدول ۳). در این مرحله، قطر جدول مساوی یک می‌شود. در مرحله بعد با تقسیم هر خانه از ماتریس قبلی بر مجموع هر ستون، ماتریس جدید به دست می‌آید که نشان دهنده امتیاز هر خانه از ماتریس است. در پایان با میانگین‌گیری از هر ردیف از ماتریس، امتیاز طبقه مختص به آن به دست می‌آید (جدول ۴). کلیه مراحل ذکر شده در بالا برای هر لایه انجام می‌شود و امتیازات به دست آمده را در محیط نرم‌افزار Arc GIS بر طبقات هر لایه اعمال می‌کنیم و متناسب با امتیازات جدید ارزش‌گذاری می‌شود. سپس با میانگین‌گیری از لایه‌های مورد استفاده، نقشه پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی به دست می‌آید.



شکل ۴: مراحل انجام روش AHP اصلاح شده

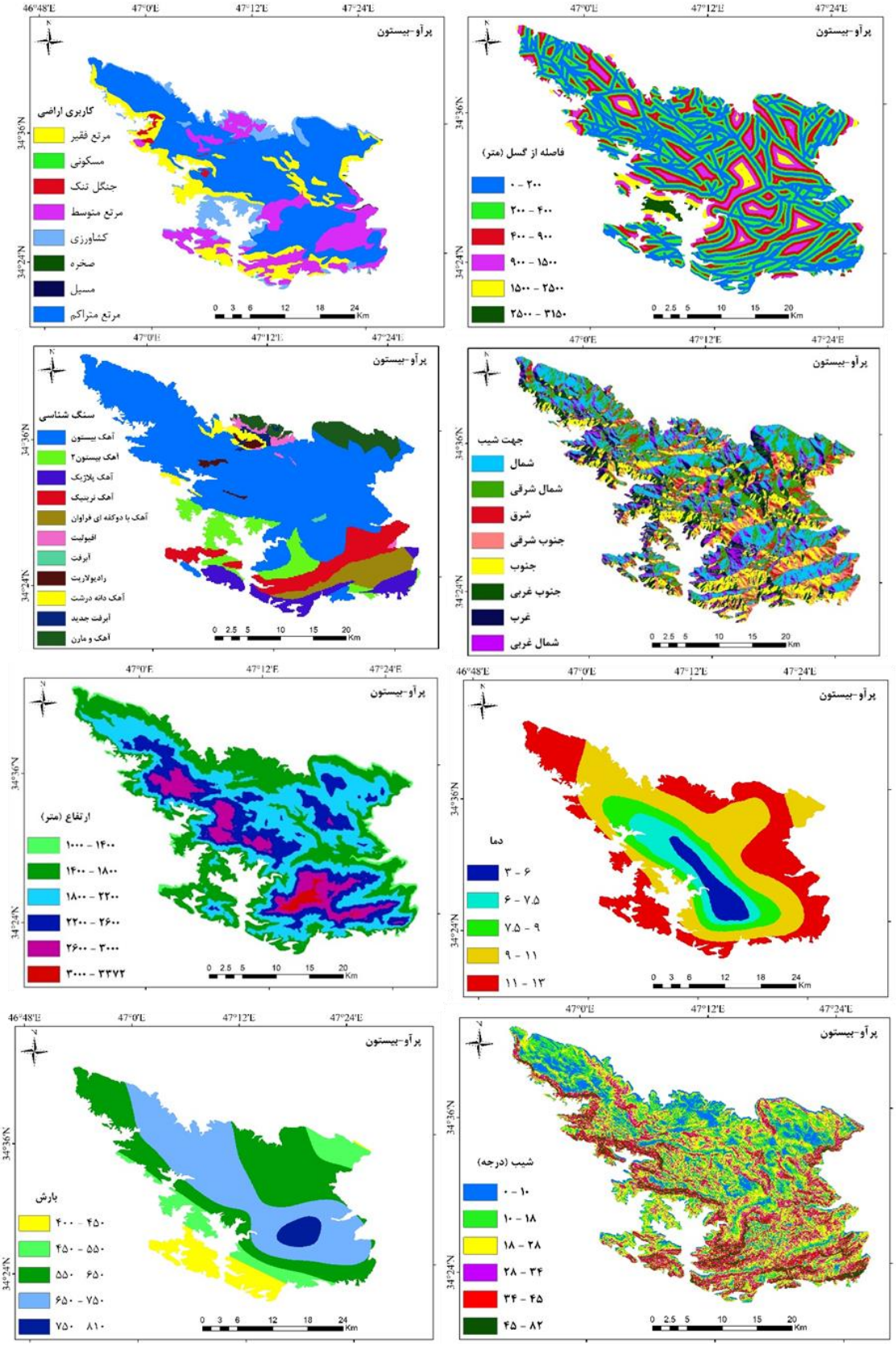
بحث و یافته‌ها

بررسی عوامل موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی

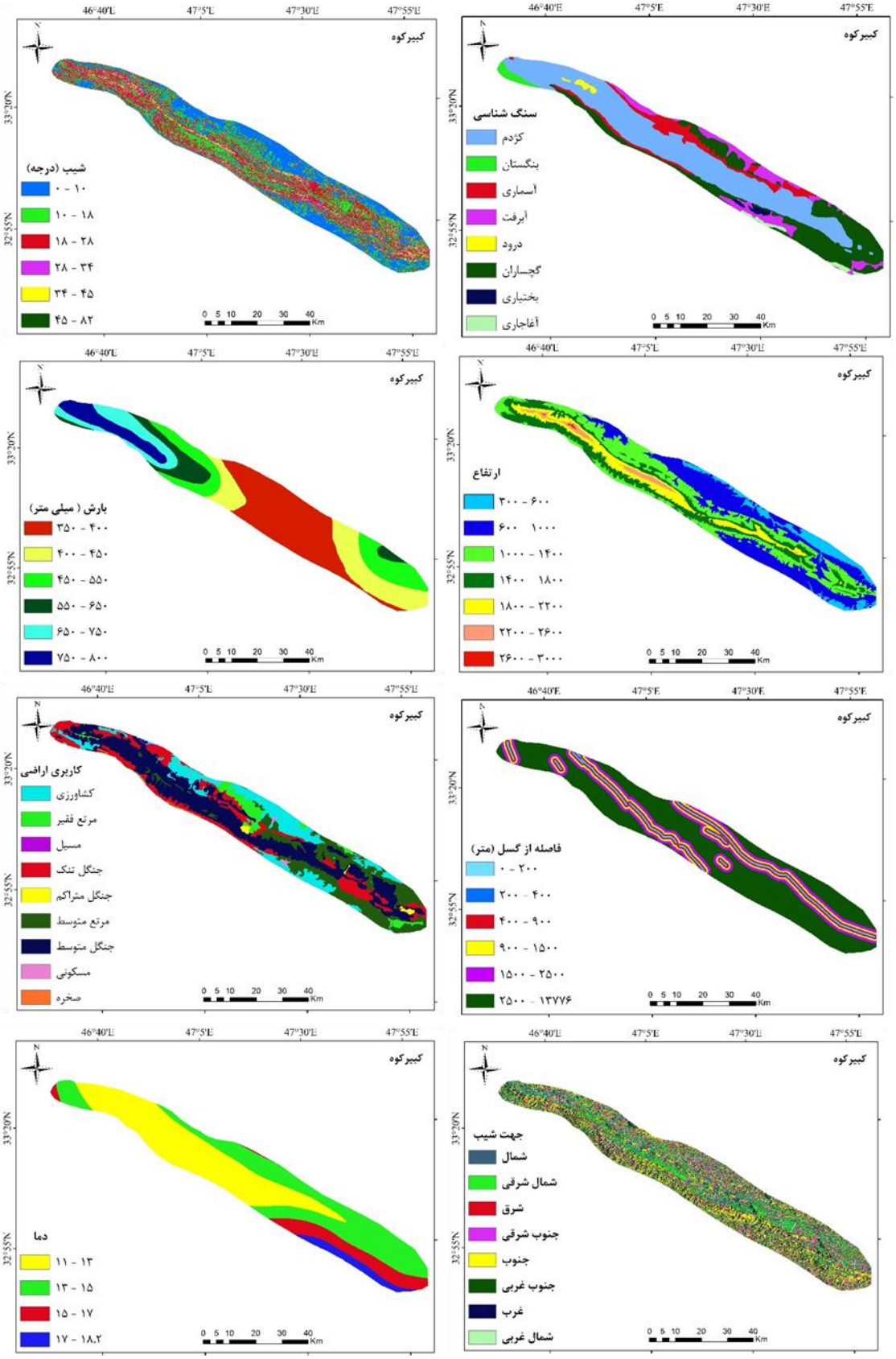
دما: قابلیت انحلال سنگ‌های کربناتی نسبت به تغییرات دما حساس است زیرا در آب‌های سرد میزان انحلال گاز کربنیک افزایش یافته و در نتیجه اسیدیته آب کاهش می‌یابد. کاهش اسیدیته با ازدیاد میزان حلالیت کربنات‌ها همراه می‌باشد. بنا به قانون هنری، حلالیت گازها در آب با فشار، نسبت مستقیم و با حرارت نسبت عکس دارد. چون حلالیت کربنات‌ها به مقدارگاز Co_2 حل شده در آب وابسته است در نتیجه هر چه حرارت کم باشد حلالیت کربنات نیز به همان نسبت افزایش

می‌یابد (مقیمی، ۱۳۹۱). مطابق نقشه دما، حداکثر میانگین دمای سالیانه در توده پرآو–بیستون ۱۳ درجه سانتیگراد است در حالی که حداقل دمای توده کبیرکوه حدود ۱۱ درجه سانتیگراد و حداکثر تا ۱۸/۲درجه می‌باشد. بررسی اولیه عامل دما بیانگر مستعد بودن توده پرآو–بیستون برای توسعه بیشتر کارست است. **بارش:** وجود آب فاکتور اصلی اقلیمی در توسعه‌ی فروچاله کارستی می‌باشد، این عامل اصلی‌ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش می‌باشد. به صورت طبیعی، کارست در مناطقی پیشرفت می‌کند که میزان بارندگی بالاتر باشد و مناطق خشک یا بسیار سرد مانع از توسعه‌ی کارست می‌گردند. هر دوی این شرایط آب و هوایی باعث کم بودن آب به صورت مایع گردیده و بنابراین باعث محدود شدن انحلال می‌گردند. لذا در مدت‌های بسیار طولانی، سنگ بدون انحلال باقی می‌ماند. وجود آب به حد کافی، سایر عوامل آب و هوایی را تحت تأثیرقرار می‌دهد و در صورت عدم وجود آب به میزان کافی(به صـورت مـایع)، اثر سایر عوامل مشهودتر خواهد بود. بنابراین پارامتر بارش رابطه مستقیم با توسعه کارست دارد. زیرا با افزایش بارش شرایط توسعه کارست مساعد شده و در نهایت کارست‌زایی افزایش می‌یابد. بررسی حداقل و حداکثر بارش نشان‌دهنده وضعیت بارشی یکسان این دو توده می‌باشد. با این که بیشترین میزان بارش در توده پرآو–بیستون اتفاق افتاده است اما از نظر مساحت تحت پوشش حجم قابل توجهی نمی‌باشد و حداکثر بارش هر دو منطقه در حدود ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد. **ارتفاع:** در مناطق مرتفع‌تر، آب و هوا سردتر است و در نتیجه هوازدگی فیزیکی مؤثرتر می‌باشد. همچنین آب دریافتی از طریق بارش‌ها نیز بیشتر است. به دلیل سرد بودن، رشد گیاهان انبوه و دارای ریشه‌های عمیق محدود می‌گردد و در نتیجه تبخیر و تعرق ناشی از گیاهان کم می‌شود، اگر چه وزش بادهای شدید در ارتفاعات موجـب افزایش تبخیر از سطح زمین می‌گردد. بنابراین پارامتر ارتفاع رابطه مستقیمی با توسعه کارست دارد. مطابق نقشه ارتفاع، تاقدیس کبیرکوه در محدوده ارتفاعی ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ متر قرار دارد در حالی که حداقل ارتفاع توده پرآو–بیستون حدود ۱۰۰۰ متر و حداکثر آن ۳۳۷۲ متر است، بنابراین می‌توان بیان کرد که هر دو توده پرآو–بیستون و کبیرکوه، از نظر توسعه فروچاله‌های کارستی وضعیت مشابهی دارند. **شیب:** در مناطق دارای شیب زیاد امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد و همچنـین رویش گیاه فراهم نمی‌باشد. بنابراین آب باران به سرعت جاری می‌شود و فرصت نفوذ نخواهد داشت. بخشی از آب نفوذ کرده نیز در امتداد لایه‌بندی حرکت می‌کند و توسعه‌ی عمودی کارست محدود می‌گردد(شمسائی، ۱۳۷۲). همچنین پارامتر شیب رابطه معکوس با ایجاد و توسعه فروچاله‌ها دارد. در شیب‌های کمتر از ۱۰ درجه بیشترین میزان توسعه فروچاله‌ها رخ می‌دهد و از شیب ۵۰ درجه به بالا به ندرت فروچاله‌ای دیده می‌شود. در کل هرچه شیب بیشتر باشد میزان توسعه فروچاله کارستی، کاهش می‌یابد. حداقل شیب دو توده صفر و حداکثر آن حدود ۸۲ درجه است. **فاصله از گسل:** براثر عملکرد فرآیندهای تکتونیکی، درزو شکافها در جهت های عمودی، افقی و مایل در توده‌های سنگی ایجاد و گسترش می‌یابند. درزه و شکافهایی که به صورت یک شبکه گسترش می‌یابند در شکل گیری و تشکیل اشکال فروچاله‌های کارستی نقش بسیار مهمی بازی می‌کنند (مقیمی، ۱۳۹۱). پارامتر فاصله از گسل رابطه معکوس با توسعه کارست دارد. زیرا در مناطق نزدیک گسل به علت تکتونیزه بودن و وجود درزه و شکاف، میزان نفوذپذیری سنگ‌ها بیشتر بوده و در نتیجه میزان کارست‌زایی افزایش می‌یابد. تراکم گسل در توده کبیرکوه بسیار پایین است اما در توده پرآو–بیستون، گسل‌ها تراکم بالایی دارند و بیشتر منطقه را تحت تسلط قرار داده‌اند. بنابراین با توجه به نقش عامل فاصله از گسل می‌توان گفت که توده پرآو–بیستون با توجه به حجم بالای شکستگی‌ها و وجود گسل‌های اصلی، پتانسیل بالاتری در توسعه کارست دارد. **سنگ شناسی:** از نظر توسعه کارست، هر چه سازندهای زمین‌شناسی کارستی خلوص بالاتری داشته باشند شرایط توسعه کارست فراهم‌تر می‌باشد. بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی مناطق مورد مطالعه بخش اعظم از مساحت توده پرآو–بیستون (۶۲ درصد)، از آهک ضخیم‌لایه بیستون تشکیل شده است که دارای خلوص بالا نیز می‌باشد و سایر بخش‌ها نیز شامل رادیولاریت‌هایی با نسبتی از گل‌سنگ، آهک سیلیس‌دار، طبقاتی از چرت رادیولاریتی و سنگ رس‌دار و آهک‌های بیوکلاستیک است. بیشترین مساحت توده کارستی کبیرکوه به ترتیب توسط

سازندهای کژدم، گچساران و آسماری پوشیده شده است. سازند آسماری از آهک‌های کرم رنگ، قهوه‌ای و در بعضی نقاط از دولومیت‌های خاکستری کرم و قهوه‌ای رنگ تشکیل شده است. سازند گچساران، شامل رسوبات گچی، نمک و مارن‌های قرمز رنگ است. سازند کژدم نیز شامل مارن، آهک رسی و شیل است. بررسی هر دو نقشه سنگ‌شناسی، نشان می‌دهد هر دو توده پرآو–بیستون و کبیرکوه از نظر عامل سنگ‌شناسی دارای پتانسیل بالایی در توسعه فروچاله کارستی هستند. **جهت شیب:** در جهات شیب شمالی به دلیل این که کمتر در معرض نور آفتاب هستند و بیشتر اوقات روز دارای سایه می‌باشند تبخیر کمتر است و همچنین برف‌های باریده شده روی آن‌ها دیرتر ذوب شده و فرصت کافی برای نفوذ را در اختیار دارند. بنابراین جهات شیب شمالی آب بیشتری برای انحلال و توسعه کارست در اختیار دارند. حدود ۴۶ درصد از مساحت توده پرآو–بیستون شامل جهات شیب شمالی می‌شود در حالی که این میزان در توده کبیرکوه حدود ۴۳ درصد است. که نشان دهنده استعداد بالاتر توده پرآو–بیستون از نظر توسعه کارست است. **پوشش گیاهی:** گیاهان بر میزان تغذیه مناطق کارستی موثرند. پوشش گیاهی در هرمنطقه سرعت جریان‌های سطحی را کاهش داده و سبب نفوذ بیشتر آب به داخل خاک می‌گردد. همچنین براساس نتایج به دست آمده از اختصاصی و همکاران(۱۳۹۰) در تحقیقی بین پوشش گیاهی و اندازه درزوشکاف‌ها رابطه مستقیمی بوده و پوشش گیاهی سبب افزایش درزوشکاف‌ها در سازند سخت شده و مقدار نفوذ را به حد چشمگیری افزایش می‌دهد. دشت‌های حاشیه توده‌های پرآو–بیستون و پابده زیر کشت دیم و آبی هستند اما به دلیل پوشیده شدن با سازندهای آبرفتی در توسعه کارست نقشی ندارند. در دامنه ارتفاعات توده پرآو–بیستون، مراتع فقیر تا متوسط وجود دارند و در راس اکثر ارتفاعات هر جا که شیب مناسب بوده خاک تشکیل گردیده و مراتع، متراکم هستند. بخش اعظم توده کبیرکوه توسط جنگل‌های تنک و با تراکم متوسط (۵۵ درصد) پوشیده شده‌اند و بعد از آن مراتع بیشترین مساحت را در برگرفته‌اند. نوع پوشش (درختی) در تاقدیس کبیرکوه این توده را از نظر توسعه کارست مستعدتر نشان می‌دهد. نقشه عوامل بیان شده در شکل ۵ برای توده پرآو–بیستون و در شکل ۶ برای توده کبیرکوه آورده شده است.

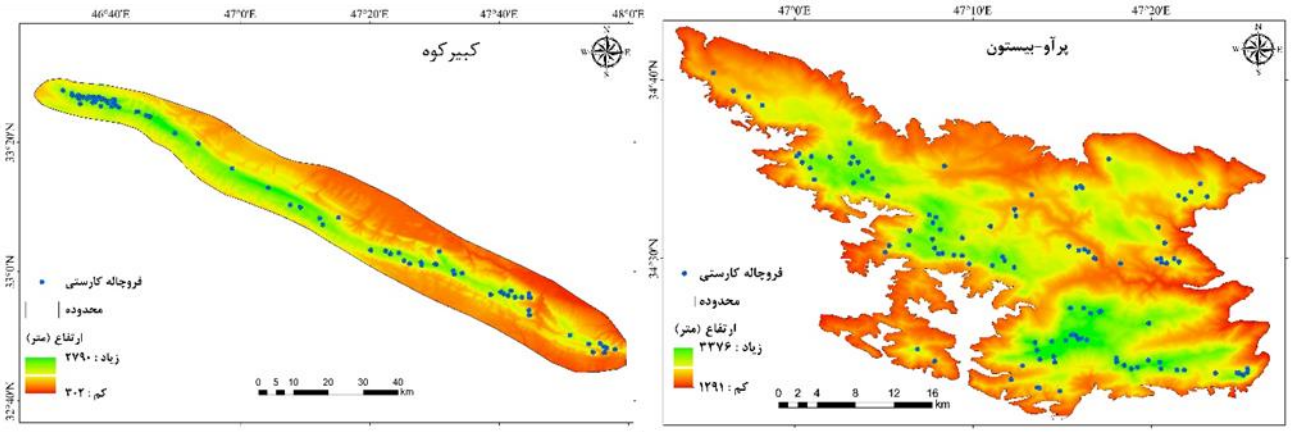


شکل ۵: نقشه عوامل موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی توده پرآو-بیستون



شکل ۶: نقشه عوامل موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی توده کبیرکوه

نقشه فروچاله‌های کارستی دو توده کارستی پرآو–بیستون و کبیرکوه از لایه ارتفاع رقومی استخراج شد که در شکل ۷، نمایش داده می‌شود. این لایه به عنوان معیاری برای امتیازدهی معیارهای موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی در نظر گرفته شد. به طوری که به هر طبقه از لایه مورد نظر مطابق با تعداد فروچاله‌های کارستی ایجاد شده در آن امتیاز داده شد. سپس تصمیم به تشکیل ماتریس مقایسه زوجی سلسله مراتبی گرفته شد و مطابق روش AHP اصلاح شده که در قسمت مواد و روش‌ها توضیح داده شد امتیازات نهایی طبقات هر لایه به دست آمد که در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۷: نقشه فروچاله‌های کارستی توده‌های پرآو–بیستون و کبیرکوه.

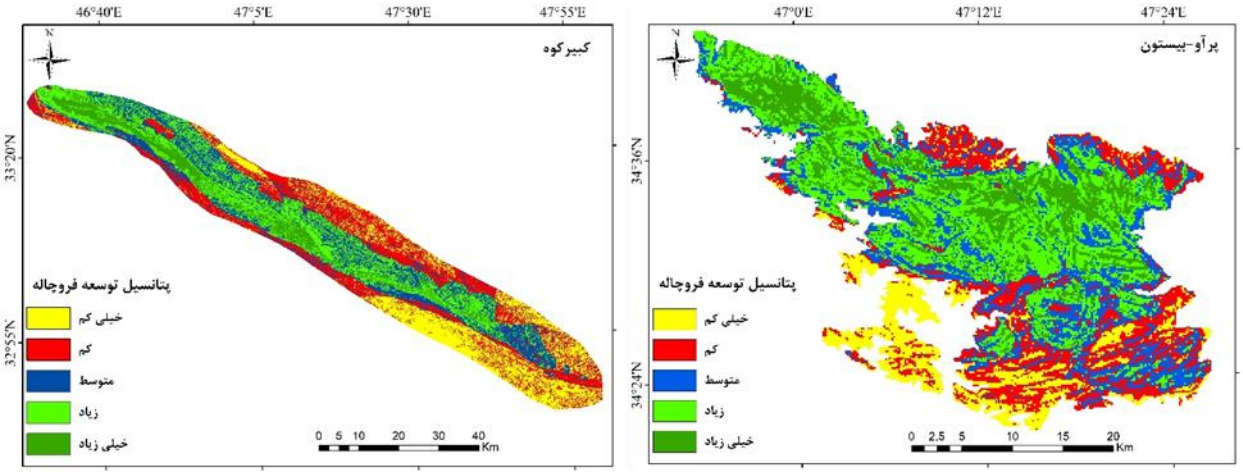
جدول ۱: مساحت و امتیاز هر یک از طبقات عوامل موثر در توسعه فروچاله کارستی توده‌های پرآو–بیستون و کبیرکوه.

معیار	طبقات	درصد مساحت		امتیاز	
		پرآو–بیستون	کبیرکوه	پرآو–بیستون	کبیرکوه
دما	۶–۳	۵/۶۶	–	۰/۰۸۶	–
	۷/۵–۶	۹/۱۸	–	۰/۱۹۴	–
	۹–۷/۵	۱۲/۱۷	–	۰/۱۳۸	–
	۱۱–۹	۳۰/۵۸	–	۰/۳۴	–
	۱۳–۱۱	۴۲/۳۸	۴۴/۶۹	۰/۲۴۲	۰/۴۶۵
	۱۵–۱۳	–	۳۸/۲۷	–	۰/۳۶۳
	۱۷–۱۵	–	۱۲/۲۴	–	۰/۰۹۱
	۱۸/۲–۱۷	–	۴/۷۹	–	۰/۰۸۱
بارش	۴۰۰ –۳۵۰	–	۳۴/۹۵	–	۰/۱۵۴
	۴۵۰–۴۰۰	۸/۹۸	۲۰/۹۷	۰/۰۷۱	۰/۲۲۴
	۵۵۰–۴۵۰	۱۰/۹۵	۱۷/۰۹	۰/۱۲۵	۰/۰۷۵
	۶۵۰–۵۵۰	۳۸/۵۸	۹/۲۶	۰/۳۶۹	۰/۰۶۳
	۷۵۰–۶۵۰	۳۸/۲۵	۹/۵۷	۰/۳۵۹	۰/۱۱۵
	۸۱۰–۷۵۰	۳/۲۳	۸/۱۴	۰/۰۷۶	۰/۳۶۹
ارتفاع	۶۰۰–۳۰۰	–	۸/۱۷	–	۰/۰۵۶
	۱۰۰۰–۶۰۰	–	۳۱/۳۷	–	۰/۰۷۴
	۱۴۰۰–۱۰۰۰	۲/۸۴	۲۷/۳۵	۰/۰۷۳	۰/۰۶۸

	۱۴۰۰–۱۸۰۰	۳۴/۷۲	۱۹/۴۳	۰/۰۷۳	۰/۰۹
	۱۸۰۰–۲۲۰۰	۳۳/۳۹	۱۱/۰۴	۰/۲۸	۰/۴۰۸
	۲۲۰۰–۲۶۰۰	۱۹/۳۴	۲/۵۲	۰/۱۵	۰/۲۲۸
	۲۶۰۰–۳۰۰۰	۸/۵۹	۰/۱	۰/۳۲	۰/۰۷۶
	۳۰۰۰–۳۳۷۲	۱/۱۰	–	۰/۱۰۴	–
شیب	۰–۱۰	۱۷/۱۳	۳۱/۴۶	۰/۳۳۲	۰/۱۱۸
	۱۰–۱۸	۲۴/۴۶	۲۸/۲۵	۰/۲۵۵	۰/۳۸۶
	۱۸–۲۸	۳۰/۰۲	۲۶/۲۸	۰/۱۳۳	۰/۱۷
	۲۸–۳۴	۱۶/۵۴	۷/۷۹	۰/۱۳۳	۰/۱۶
	۳۴–۴۵	۷/۸۳	۴/۸۵	۰/۰۷۵	۰/۰۸۷
	۴۵–۸۲	۴	۱/۳۴	۰/۰۷۲	۰/۰۷۹
فاصله از گسل	۰–۲۰۰	۳۸	۳/۰۴	۰/۲۱	۰/۰۷۷
	۲۰۰–۴۰۰	۳۲/۴۲	۳/۰۳	۰/۴	۰/۰۹۴
	۴۰۰–۹۰۰	۱۷/۷۹	۷/۸۹	۰/۱۶۴	۰/۰۷۷
	۹۰۰–۱۵۰۰	۷/۶۹	۹/۲۵	۰/۰۹۱	۰/۱۱۵
	۱۵۰۰–۲۵۰۰	۲/۹۹	۱۴/۷۳	۰/۰۷	۰/۱۳
	۲۵۰۰–۳۱۵۰	۱/۰۸	۶۲/۰۵	۰/۰۶۵	۰/۵۰۷
سنگ شناسی	آهک بیستون	۶۱/۸۷	–	۰/۴۵۱	–
	آهک پلاژیک	۷/۸۶	–	۰/۱۰۱	–
	آهک نریتیک	۹/۱۴	–	۰/۰۶۵	–
	آهک با دو کفه ای های فراوان	۵/۶۱	–	۰/۱۰۱	–
	افیولیت	۱/۱۶	–	۰/۰۴۷	–
	آبرفت	۰/۱۵	۹/۶	۰/۰۴۷	۰/۰۶۱
	رادیولاریت	۰/۸۵	–	۰/۰۴۷	–
	آهک دانه درشت	۱/۷۶	–	۰/۰۴۷	–
	آبرفت جدید	۰/۵۸	–	۰/۰۴۷	–
	آهک و مارن	۰/۰۴	–	۰/۰۴۷	–
	سازند کژدم	–	۶۸/۴۸	–	۰/۵۲۹
	سازند بنگستان	–	۱/۶۲	–	۰/۰۶۲
	سازند آسماری	–	۹/۹۲	–	۰/۰۶۱
	سازند درود	–	۰/۷۵	–	۰/۰۶۱
	سازند گچساران	–	۲۷/۱۵	–	۰/۰۹۴
	سازند بختیاری	–	۰/۸۹	–	۰/۰۶۶
	سازند آغاجاری	–	۱/۳۷	–	۰/۰۶۶
جهت شیب	شمال	۲۲/۵۹	۱۷/۱۳	۰/۲۴۶	۰/۲۸۹
	شمال‌شرقی	۱۶/۴۹	۱۷/۰۸	۰/۱۱۵	۰/۱۲۴
	شرق	۷/۳۷	۹/۰۱	۰/۰۸۶	۰/۱۰۳
	جنوب‌شرقی	۹/۳۷	۹/۷۹	۰/۰۵۳	۰/۰۷۷
	جنوب	۱۶/۱۱	۱۶/۲۱	۰/۰۶۴	۰/۱۶
	جنوب‌غربی	۱۰/۸۲	۱۴/۵۶	۰/۰۸۹	۰/۰۶۶
	غرب	۷/۲۳	۷/۵۸	۰/۰۷۳	۰/۱۰۹

	شمال‌غرب	۶/۹۷	۸/۶۱	۰/۲۷۴	۰/۰۷۲
پوشش گیاهی	مرتع فقیر	۱۵/۴۲	۵/۰۲	۰/۲۳۸	۰/۰۷۶
	مسکونی	۰/۸	۰/۴۸	۰/۰۷۴	۰/۰۵۷
	مرتع متوسط	۱۸/۳۰	۲۶/۱۹	۰/۰۶۲	۰/۰۶
	کشاورزی	۹/۶۱	۱۷/۲۶	۰/۰۶۳	۰/۰۵۶
	صخره	۰/۱۵	۰/۴	۰/۰۶۳	۰/۰۵۶
	مسیل	۰/۰۰۳	۰/۱۴	۰/۰۶۲	۰/۰۵۶
	مرتع عالی	۵۵/۶۰	–	۰/۳۷۲	–
	جنگل تنک	۰/۸۰	۱۷/۸	۰/۰۶۶	۰/۱۲۲
	جنگل متوسط	–	۳۶/۹۵	–	۰/۴۵۲
	جنگل انبوه	–	۰/۷۲	–	۰/۰۶۵

پس از اجرای مدل اصلاح شده AHP، نقشه نهایی پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی توده‌های پرآو–بیستون و کبیرکوه به دست آمد که در شکل ۸ نشان داده می‌شوند. این نقشه در ۵ کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به روش شکستگی‌های طبیعی در محیط Arc map طبقه‌بندی شدند و مساحت و درصد هر یک از طبقات پتانسیل توسعه فروچاله به دست آمد که در جدول ۲ نشان داده می‌شود. مطابق اطلاعات این جدول، ۱۲/۷۵، ۱۸/۸۹، ۲۲/۲۰، ۲۸/۲۰ و ۱۷/۹۵ درصد از توده کارستی پرآو–بیستون و ۲۰/۶۷، ۲۶، ۲۲/۳۲، ۲۰/۹ و ۱۰/۱۱ درصد از توده کبیرکوه به ترتیب دارای پتانسیل توسعه فروچاله خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد هستند. طبق تحقیقات پیشین انجام شده در مورد توده پرآو–بیستون (ملکی و همکاران، ۱۳۹۹ و عابدینی و همکاران، ۱۳۹۴) بیشترین پتانسیل توسعه فروچاله‌های کارستی در مناطق میانی این توده قرار دارد که با تحقیق حاضر همخوانی دارد که شکل نهایی انطباق بیشتری با تحقیق ملکی و همکاران (۱۳۹۹) دارد. همچنین نتیجه پتانسیل توسعه کارست کبیرکوه با تحقیق انجام شده توسط زروش و همکاران (۱۳۹۳) تطابق بالایی را نشان می‌دهد.



شکل ۸: نقشه نهایی پتانسیل توسعه فروچاله توده کارستی پرآو–بیستون و کبیرکوه.

جدول ۲: مساحت و درصد طبقات پتانسیل توسعه فروچاله کارستی توده‌های پرآو-بیستون و کبیرکوه.

پتانسیل توسعه فروچاله	پرآو-بیستون		کبیرکوه	
	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
خیلی کم	۱۱۵/۳۵	۱۲/۷۵	۵۲۴/۳۵	۲۰/۶۷
کم	۱۷۰/۸۳	۱۸/۸۹	۶۵۹/۵۴	۲۶
متوسط	۲۰۰/۸۱	۲۲/۲۰	۵۶۶/۱۸	۲۲/۳۲
زیاد	۲۵۵/۱	۲۸/۲۰	۵۳۰/۱۴	۲۰/۹
خیلی زیاد	۱۶۲/۳۸	۱۷/۹۵	۲۵۶/۴۴	۱۰/۱۱

نتیجه‌گیری

با توجه به مساحت سه برابری توده کبیرکوه نسبت به توده پرآو-بیستون، نقشه فروچاله‌های کارستی بیانگر وجود تعداد بالاتر فروچاله در توده پرآو-بیستون نسبت به توده کبیرکوه است. این نقشه‌ها به عنوان پایه امتیازدهی به طبقات لایه‌های موثر در توسعه فروچاله‌های کارستی در مدل AHP اصلاح شده قرار گرفتند. نتایج بررسی پتانسیل توسعه‌یافتگی فروچاله-های کارستی نشان می‌دهد که ۶۸/۳۵ درصد (۶۱۸ کیلومتر مربع) از توده پرآو-بیستون و ۵۳/۳۳ درصد (۱۳۵۳ کیلومترمربع) از مساحت توده کبیرکوه دارای پتانسیل متوسط به بالا از نظر توسعه‌یافتگی فروچاله‌ها هستند. مقایسه وضعیت دو توده نشان می‌دهد که توده پرآو-بیستون و کبیرکوه از نظر عوامل بارش، ارتفاع، شیب، سنگ‌شناسی و جهت شیب وضعیت تقریبا مشابهی دارند، اما بررسی طبقاتی که بیشترین تعداد فروچاله‌ها و بالاترین امتیاز از مدل AHP را دارند نشان می‌دهد که در توده پرآو-بیستون برای لایه بارش، طبقه ۵۵۰-۶۵۰ میلی‌متر، برای لایه ارتفاع طبقه بالای ۳۰۰۰ متر، برای لایه شیب طبقه ۰ تا ۱۰ درجه، برای لایه جهت شیب طبقه شمال و در توده کبیرکوه برای لایه بارش طبقه ۷۵۰ تا ۸۱۰، برای لایه ارتفاع طبقه ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰، برای لایه شیب طبقه ۱۰ تا ۱۸ و برای لایه جهت شیب طبقه شمال بیشترین امتیاز را دارند. همچنین بیشترین امتیاز برای لایه سنگ‌شناسی، طبقه حاوی آهک ضخیم لایه (آهک بیستون برای پرآو-بیستون و سازند کژدم برای کبیرکوه) می‌باشد. بررسی وضعیت لایه‌های دما، تراکم گسل و پوشش گیاهی بیانگر تفاوت بارز در اوضاع این لایه‌ها است توده پرآو-بیستون از نظر دما وضعیت مناسب‌تری برای توسعه فروچاله کارستی دارد اما با این اوصاف طبقه ۱۱ تا ۱۳ درجه دارای بیشترین امتیاز برای هر دو توده است. توده پرآو-بیستون تراکم بسیار بالاتری از نظر تعداد گسل‌ها دارد و به همین خاطر طبقه فاصله از گسل ۰ تا ۲۰۰ متری دارای بیشترین امتیاز در این توده است اما می‌توان گفت که در توده کبیرکوه، گسل‌ها نقش بسیار ضعیفی در توسعه فروچاله‌های کارستی دارند و بیشترین تعداد فروچاله در طبقه فاصله از گسل ۲۵۰۰ متری به بالا قرار گرفته‌اند. از نظر پوشش گیاهی توده کبیرکوه وضعیت بهتری دارد و بیشترین تعداد فروچاله در طبقه جنگل با تراکم متوسط قرار دارد اما در توده پرآو-بیستون، به دلیل عدم وجود پوشش جنگلی و رخنمون زیاد صخره‌ها، مراتع بالاترین امتیاز را در توسعه فروچاله‌های کارستی دارند. در مجموع می‌توان گفت هر دو توده دارای پتانسیل بالایی در توسعه فروچاله‌های کارستی هستند اما با در نظر گرفتن مجموع شرایط و تعداد فروچاله‌ها می‌توان اظهار نظر کرد که توده پرآو-بیستون به عنوان بخشی از زاگرس مرتفع، پتانسیل بالاتری داشته باشد که مهمترین برتری بارز این توده نیز در تراکم بالای گسل و شکستگی نسبت به توده کبیرکوه است.

منابع

- اختصاصی، م.، صحتی، م.، مصلح آرایی، آ و عظیم‌زاده، ح.، ۱۳۹۰، تاثیر برخی از خصوصیات واحدهای سنگی آندزیتی و گرانیتی بر روی میزان استقرار پوشش گیاهی در مناطق خشک (مطالعه موردی: مهریز– یزد)، پژوهش های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، دوره:۲۴، شماره ۳، ص ۳۲–۴۳.
- پاریزی، ا.، زمان زاده ، م.، امینی، م.، ۱۳۹۷، مدل‌سازی مولفه‌های مورفومتری دولین‌ها و ارائه شاخص بعد فراکتال در مطالعه گسل های مناطق کارستی (مطالعه موردی، مناطق کارستی بین پراو و شاهو)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دروه ۶، سال ششم، شماره ۴، ص ۱–۱۶.
- جعفربیگلو، م.، مقیمی، ا. و صفری، ف.، ۱۳۹۰، استفاده از *DEM* در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پرآو ـ بیستون مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۲، شماره ۴، ص ۱–۱۸.
- زروش، ن.، واعظی، ع.، کریمی، ح.، ۱۳۹۳، ارزیابی پتانسیل توسعه کارست در تاقدیس کبیرکوه استان ایلام با استفاده از تلفیق فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (*AHP*) و سنجش از دور و *GIS*، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، دوره۳، شماره ۳، ص ۱۴۴–۱۵۷.
- شمسایی، ا.، ۱۳۸۱، هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل، جلد دوم (مهندسی آب‌های زیرزمینی)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- عابدینی، م.، کامرانی، م. و اقبال، م.ر.، ۱۳۹۴، بررسی عوامل مؤثر در شکل‌گیری فروچاله‌ها در سازندهای کارستی با استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره در محیط *ArcGIS* و *SPSS* (مورد مطالعه: ناهمواری‌های بیستون ـ پرآو)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۶۰، ص ۴۱–۶۲.
- غلام حیدری، ح.، کریمی، ح.، انتظاری، م. و رامشت، م.ح.، ۱۴۰۰، بررسی عوامل مؤثر بر تکامل فروچاله‌های کارستیک در سازند گچساران با استفاده از مدل فازی نمونهٔ پژوهش: دشت مارون کهگیلویه و بویراحمد، فصلنامه علمی برنامه‌ریزی فضایی، سال یازدهم، شماره ۳، ص ۴۵–۷۲.
- قربانی، م.ص.، محمودی، ف.، یمانی، م. و مقیمی، ا.، ۱۳۸۹، نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی؛ مطالعهٔ موردی: ناهمواری‌های شاهو، غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، ۱–۱۶.
- کریمی وردنجانی، ح.، ۱۳۸۹، هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها)، انتشارات ارم شیراز.
- محمدخان، ش.، ۱۳۸۸، برآورد کمی فرسایش و رسوب به روش ژئومرفولوژی (مطالعه موردی حوزه آبخیز لتیان)، رساله دکتری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- محمدخان، ش.، احمدی، ح.، فیض‌نیا، س. و سلاجقه، ع.، ۱۳۸۹، بررسی اثر شیب بر شدت فرسایش آبی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز لتیان)، پژوهش‌های آبخیزداری، دوره ۲۳، شماره ۴، ص ۷۳–۸۱.
- مقیمی، ه.، ۱۳۹۱، هیدرولوژی کارست، انتشارات دانشگاه پیام نور، تهران.
- ملکی، م.، جوزک، ع. و سدیدی، ج.، ۱۳۹۹، شناسایی مناطق مستعد فروچاله در حوضه کارستی بیستون ـ پرآو، فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی. سال اول، شماره ۳، ص ۶۷–۸۰.
- علایی طالقانی، م.، ۱۳۸۶، ژئومورفولوژی ایران، انتشارات قومس، تهران.

- *Braud, J. 1989. LA suture du Zagros au niveau de Kermanshah (Kurdistan Iranian): Mem Geodiffusion, 5, 489 P., 125 Fig, 1, Carte H, T., Paris.*
- *British Columbia, Ministry of Forests, 2003. Karst management Handbook for British Columbia. www.publications.gov.bc.ca.*
- *Ezersky, M. & FRUMKIN, A., (2013). Fault- Dissolution Front relations and the DEAD Sea sinkhole problem. Geomorphology, 201, PP 35-40.*

- *Fadaei, H., Sahebi Vayghan, S., Esmaili Sarteshnizi, R. and Ghasemkhani, N., (2020). Using GIS and DANP in detecting potential areas for Sinkholes. Earth Observation and Geomatics Engineering, 4(2), 132-147.*
- *Ford, D. C. & Williams, p. w., 1989. Karst geomorphology and hydrology. Springer Netherlands.*
- *Lindsay, J.B., Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. Hydrological Processes, 30, 846-857.*
- *Nam, B. H., Kim, Y. J. & Youn, H., (2020). Identification and quantitative analysis of sinkhole contributing factors in Florida's Karst. Engineering Geology, **271**: 105610.*
- *Ozdemir, A., 2015. Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of karapinar, Turkey. Geomorphology, 245,pp 40- 50.*
- *Perrin, J., Cartannaz.,C., Noury, G. & Vanoudheusden, E., (2015). A multicriteria approavh to karst subsidence hazar mapping supported by weights-of-evidence analysis. Engineering Geology, 197, 296-305.*
- *Rosdi, M.A.H.M., Othman, A.N., Abdul, M.A.M.Z.Z. and Yusoff, Z.M., (2017). Sinkhole susceptibility hazard zones using GIS and analytical hierarchical process (AHP): A case study of Kuala Lumpur and ampang Jaya. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 42.*
- *White, W. B., 1988. Geomorphology and Hydrology of karst., oxford university press.*