



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 - پراو)

موسی عابدینی*، دانشیار دانشگاه محقق اردبیلی

معصومه چراغی کارمرانی، کارشناسی ارشد فارغ التحصیل از دانشگاه محقق اردبیلی

محمد رضا اقبال، دانشجوی دکترا دانشگاه خوارزمی تهران

وصول: ۱۳۹۲/۹/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳، صص ۶۲-۴۱

چکیده

پهنه‌های کارستی در برخورد با عوامل مؤثر متنوع و پیچیدگی مکانیسم آن‌ها در ارتباط باهم و با توجه به نقش آن‌ها در تحول و حساسیت کارست‌زایی واکنش متفاوتی بروز می‌دهند؛ بنابراین امروزه در برنامه‌ریزی‌های محیطی به مطالعات اولیه و تهیه نقشه‌های ممیزی استعداد شکل‌گیری اشکال کارستی، اهمیت خاصی داده می‌شود. ناهمواری‌های بیستون-پراو به‌عنوان منطقه مورد پژوهش با سازندهای آهکی بخشی از زون چین‌خورده و تکتونیزه شده بوده که مستعد شکل‌گیری اشکال متنوع کارستی است. لذا هدف اصلی این پژوهش مطالعه عوامل مؤثر در توسعه کارست با تأکید بر فروچاله‌ها و پهنه‌بندی استعداد توسعه و حساسیت منطقه کارستی بیستون-پراو است. روش پژوهش توصیفی-تحلیلی و همبستگی بوده و نوع آن کاربردی است. متغیرهای پژوهش شامل یک متغیر وابسته (فروچاله‌ها) و هفت متغیر مستقل (بارش، دما، شیب، جهت شیب، ساختار زمین‌شناسی، گسل و ارتفاع) بوده است که در برای سنجش ارتباط بین این متغیرها تمام لایه‌های مؤثر در تشکیل کارست با استفاده از نرم‌افزارهای GIS مورد پردازش و کدگذاری قرار گرفته و با استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره در محیط SPSS روابط آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از معادله رگرسیونی و نتیجه‌ی تأثیر دادن ضرایب رگرسیونی متغیرها در ماتریس داده‌ها بر اساس روابطی (استعداد وقوع فروچاله‌ها) به‌صورت طیفی از اعداد مثبت و منفی درآمده است. اعداد مثبت بیانگر وجود شرایط لازم برای توسعه کارست و اعداد منفی بیانگر نبودن شرایط مناسب برای توسعه کارست است. دامنه این طیف عددی، به‌صورت کیفی به سه کلاس، استعداد کم، استعداد متوسط و استعداد زیاد تقسیم شده است. تفسیر ضرایب و نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که لیتولوژی مهم‌ترین نقش را در توسعه کارست بر عهده دارد و بعد از آن به ترتیب لایه‌های گسل، بارش، ارتفاع، دما، شیب و جهت شیب در درجات بعدی اهمیت قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: استعداد کارست، فروچاله، رگرسیون خطی چند متغیره، بیستون-پراو، GIS.

مقدمه

فرایند توسعه و تحول کارست فرآیندی پیچیده و متأثر از عوامل متنوع و متفاوتی است و توسعه اشکال کارست گاهی همراه با مخاطرات محیطی برای انسان‌ها است. با این وجود آب شرب ۲۵٪ جمعیت جهان از منابع آبی کارستی تأمین می‌گردد (گیلیسون، ۲۰۰۱: ۲۲). سازندهای کارستی ۱۱٪ از رخنمون‌های سطحی را در ایران به خود اختصاص می‌دهند (افراسیابیان، ۱۳۷۲: ۱۲۷). نتیجه عمل کارستی شدن ایجاد ژئومورفولوژی ویژه است که مناطق کارستی را از نواحی غیر کارستی جدا می‌کند. کارست حاصل فرایندهای متنوعی است که در سنگ‌های انحلال‌پذیر مختلف و تحت شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و هیدرو-ژئومورفولوژی متفاوتی پدید می‌آید. تشکیل این ساختارهای کارستی بیشتر در مناطق سرد و مرطوب با بارش بیش از ۳۰۰ میلی‌متر که دارای سنگ‌بستر کربنات یا تبخیری باشند، بیشتر است (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸). در اصطلاح فنی برای تشکیل کارست، پدیده خوردگی و انحلال توده سنگ‌های کربنات (آهک و دولومیت) را عامل اصلی تعریف می‌کنند (قبادی، ۱۳۸۶).

مناطق کارستی نقش مهمی در زندگی ساکنان خود داشته و به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک این توده‌ها از اهمیت زیادی در تأمین ذخایر آبی برخوردار هستند (بهمنیافر، ۱۳۸۸: ۱۲۲). شناسایی اشکال کارست و مشاهدات و تحلیل آن‌ها، روش‌هایی هستند که نمی‌توان آن‌ها را از بررسی‌های پیچیده پهنه‌های

کارستی جدا کرد (ملکی، ۱۳۸۸: ۹۳). یکی از عوامل مهم تشکیل کارست خرد شدن توده‌های سنگی در اثر نیروهای مورفوتکتونیک است. در مناطق کارستی آب جمع شده در حفره‌های بسته‌ی کارستی یا فروچاله‌ها از راه چاه‌های فروکش به‌طور مستقیم به مجراهای زیرزمینی نفوذ می‌کند و بدون هیچ تصفیه‌ای وارد آبخوان‌های کارستی می‌شود. مورفولوژی کارست نقش مهمی در ارزیابی حساسیت آبخوان‌های کارستی دارد (پلان^۱ و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۲۲). میلیون‌ها نفر از مردم در مناطق کارستی زندگی می‌کنند اما مناطق کارست بسیار آسیب‌پذیر هستند بنا به اهمیت مناطق کارستی تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری این مناطق بسیار بااهمیت است؛ به‌علاوه پهنه‌های کارستی با دارا بودن ویژگی‌های خاص و انحلال‌پذیری و ساختاری و واکنش متفاوت آن‌ها به عوامل مورفودینامیک و مورفوتکتونیک، در پروژه‌های عمرانی نیازمند مطالعه ویژه هستند. باوجود این شکل‌گیری و توسعه آن‌ها در برخی مناطق منجر به فرونشست زمین و مخاطراتی برای تأسیسات عمرانی، خطوط ارتباطی و مناطق مسکونی را به دنبال دارد. با توجه به اینکه توده بیستون-پراو در تقسیمات واحدهای زمین‌شناسی ایران در زون زاگرس (زاگرس رورانده و مرتفع) واقع شده است و با توجه به خصوصیات تکتونیک و زمین‌شناسی و اقلیمی حاکم بر آن اشکال کارستی تکامل یافته و بسیار شاخصی در آن شکل گرفته است؛ تکامل اشکال کارست در منطقه و عوارضی نظیر غار-های متعدد، حفره‌ها، چاه‌ها و سراب‌های متعدد با

حجم آبدهی بالا از ویژگی‌های بارز این منطقه است. از طرفی پدیده سینک هول یا فروچاله^۱ یکی از تپیک‌ترین اشکال کارستی منطقه بیستون-پراو است که منجر به تغذیه آب سفره‌های زیرزمینی منطقه می‌شود. به دلیل اهمیت آن در منطقه انجام پژوهش با موضوع بررسی نقش عوامل مؤثر در توسعه فروچاله و ممیزی استعداد مناطق مختلف برای شکل‌گیری بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

بدیهی است که کارست‌زایی از مدل کاتاکلسیم یا مدل فرآیندی تبعیت می‌کند، به‌طوری‌که نتیجه‌ی عملکرد گروهی از عوامل مختلف است (رامشت و همکاران، ۱۳۸۶: ۳۷). فرایند کارستی شدن در سنگ‌ها ممکن است در فرایند سنگ‌زایی آغاز شده باشد (باسک^۲، ۲۰۰۳: ۲۴)؛ لذا در پژوهش حاضر به بررسی عوامل مؤثر در به وجود آمدن عوارض و اشکال کارستی منطقه مورد مطالعه و مسائل ناشی از کارستی شدن جهت مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی منطقه و هرگونه اقدامات عمرانی دیگر در این منطقه پرداخته می‌شود. با توجه به محصور شدن این توده کوهستانی به‌وسیله دشت‌های میانراهان، کرمانشاه، کامیاران، رازآور و بیستون، حاشیه این توده کوهستانی در محل اتصال به دشت‌های اطراف به‌صورت دیواره‌های تند و خشن قابل مشاهده است. ایجاد و توسعه واریزه‌های فراوان در کنار جاده‌ها و بعضاً روستاهای اطراف بر اثر مورفودینامیک فعال منطقه، ساکنین اطراف این توده کوهستانی و کارستی را در معرض مخاطرات ناشی از

ویژگی‌های مورفولوژیک آن قرار داده است؛ بنابراین از دیگر ضرورت انجام پژوهش حاضر وجود مسئله فوق در این توده کوهستانی است. به‌رغم تنوعی که در سرزمین‌های کارستی وجود دارد این جمله آغازین یعنی هیدرولوژی و سیمای متمایز سرزمین‌های کارستی طلیعه‌ای است که بسیاری محققین برای گفتار فنی خویش برگزیده‌اند (پاریس و گان^۳، ۲۰۰۷: ۹۸).

بررسی منابع منتشره در ارتباط با موضوع پژوهش در منطقه بیستون-پراو نشان داد که پژوهش‌های محدودی با روش و موضوع متفاوت در آن به عمل آمده است. باوجود این پژوهش‌های زیادی مرتبط با موضع در گوشه و کنار کشورمان و جهان انجام گرفته است که به نمونه‌هایی از آن اشاره می‌شود:

جعفری‌گلو و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل DEM به تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده بیستون-پراو پرداخته و به این نتایج دست‌یافته‌اند که در بیستون-پراو اشکال آگزوکارست در فرم‌ها و ابعاد مختلف توسعه‌یافته و تپیک‌ترین این اشکال یعنی فروچاله‌ها در امتداد درزها و گسل‌های کششی ناحیه قرار گرفته‌اند و همچنین فروچاله‌های مستخرج از DEM نیز نشان‌دهنده چنین امتداد و روندی است.

مقصودی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی توسعه کارست در بیستون-پراو با استفاده از ضرایب فرود و زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که بررسی مقادیر ایزوتوپی چشمه‌ها همچون میزان تریتیوم، کربن ۱۴ و فشار گازکربنیک نیز نشان‌دهنده

1 Sink holl

2 Bosak

نشان داده که وجود تخلخل ثانویه بالا (تکتونیک و مکانیکی و انحلالی) به صورت انواع گسل‌ها، میکرو گسل، درز و شکاف‌ها، به ویژه در انواع سنگ آهک‌ها و دولومیت‌ها، موجب نفوذپذیری زیاد و منجر به تسریع کارست شده است. غارها، انواع دولین‌ها دره‌های کارستیک، پن‌ها و لایپه‌ها، جزو اشکال کارستیک تپیک منطقه هستند.

عارفی (۱۳۸۵) در پژوهشی ژئومورفولوژی و منابع آب کارست ارتفاعات شاهو، شمال شهرستان‌های جوانرود و پاوه در استان کرمانشاه را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بدون توجه به مطالعات ژئومورفولوژی کارست امکان دستیابی به یک نتیجه مطلوب و دقیق در مطالعات هیدرولوژیکی مناطق کارستی بسیار دشوار و احتمالاً غیرممکن است. خانلری و مؤمنی (۱۳۹۱) به مطالعه کارست و بررسی ویژگی‌های تزریق‌پذیری پی سنگ سد اکباتان پرداخته‌اند و به این نتیجه دست‌یافته‌اند که با توجه به لزوم اجرای عملیات افزایش ارتفاع سد، به‌منظور افزایش توان باربری پی سنگ و جلوگیری از فرار آب اقدام به اجرای پره آب‌بند و عملیات تزریق سیمان گردیده است. در همین راستا خالقی و موید (۱۳۸۹) به مطالعه شناسایی منابع آب کارست با استفاده از روش‌های مورفوتکتونیک در جنوب غرب هادیشهر پرداخته و با توجه به نتایج موفقیت‌آمیز حفاری و استخراج آب زیرزمینی باکیفیت مناسب این مطالعه می‌تواند برای پی‌جویی آب زیرزمینی در سازندهای سخت مستعد

کارستی بودن منطقه است؛ از طرف دیگر میزان خشکیدگی چشمه‌ها ضریب آلفا و حجم ذخیره دینامیکی آن‌ها (چشمه‌های اطراف بیستون-پراو) در مقایسه با دیگر چشمه‌ها نیز دلالت بر توسعه کارست در منطقه دارد و تغذیه مجرای و کانالیزه چشمه‌ها را نشان می‌دهد. ملکی و محمودی (۱۳۸۰) به مطالعه و بررسی تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون-پراو پرداخته و به این نتیجه دست‌یافته که نقش این ناهمواری‌ها در تأمین و مدیریت منابع آب زیرزمینی و شکوفایی منطقه بسیار مهم است. همچنین ملکی (۱۳۸۶) به مطالعه نقش ژئومورفولوژی کارست در بررسی هیدروژئولوژی ناهمواری‌های بیستون-پراو پرداخته و به این نتیجه رسیده که بدون توجه به این مطالعات، امکان دستیابی به یک نتیجه مطلوب و دقیق بسیار دشوار و احتمالاً غیرممکن است. باوجوداین، پژوهش‌های زیادی مرتبط با موضوع پژوهش حاضر در مناطق مختلف کشور و جهان به‌عمل آمده که به اجمال به نمونه‌هایی از آن‌ها اشاره می‌شود:

افراسیابیان (۱۳۸۴) به بررسی نقش پدیده‌های کارستی در جلوگیری از خطرات و شناخت آسیب‌پذیری مناطق کارستی می‌پردازد وی ضمن بحث و بررسی پدیده سینک‌هول‌ها به‌عنوان عوارض ریسک‌پذیر کارستی و درجه‌بندی آن‌ها اشاره کرده و اهمیت و توجه به شناخت هیدروژئولوژی و مهندسی کارست در کشور را مورد تأکید قرار داده است. عابدینی (۱۳۸۴) به مطالعه و بررسی کارستیک منطقه تکتونیزه شده دره دیز و دیوان داغی پرداخته و نتایج

سایر نواحی آذربایجان که دارای مسائل مشابه هستند راهگشا باشد.

علایی طالقانی و رحیم‌زاده (۱۳۸۹) به مطالعه و بررسی تحول کارست در منطقه زاگرس پرداخته و نتایج بررسی وی حاکی از آن است که حدود ۶۹۲۲۸ کیلومترمربع از مساحت زاگرس از کارست کامل، حدود ۴۱۰۲ کیلومترمربع کارست نارس و حدود ۳۱۲۰۷ کیلومترمربع نیز از کارست بینابین پوشیده شده است.

طاهری و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعه مخاطرات کارست در ایران با نگرشی بر ماهیت زمین‌شناسی و انسان‌زادی فروچاله‌های همدان پرداخته و به این نتایج دست یافته است: فروچاله‌های کارستی دشت‌های کبودرآهنگ و فامنین همدان به‌عنوان بارزترین خطرات کارست ایران معرفی شده و مدل مفهومی ماهیت زمین‌شناسی و انسان‌زادی آن‌ها نیز ارائه شده است. مقدم شبیلو و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی وضعیت تخلخل و فرایند کارستی شدن در نهشته‌های یال جنوبی طاقدیس خورموج بوشهر پرداخته و به این نتیجه دست یافته‌اند که از نظر ساختمانی کارست‌های این محدوده را می‌توان جز کارست‌های ژئوسنکلینالی که متحمل چین‌خوردگی، گسلش و شکستگی‌های زیادی شده‌اند قرار داد. رضایی مقدم و قادری (۱۳۹۰) به مطالعه تحلیل‌های کمی دولین‌ها در زمین‌های کارستی در منطقه تخت سلیمان پرداخته‌اند. در این بررسی بعد از تجزیه و تحلیل آماری مشخص شده هرچند که بزرگ‌ترین دولین‌ها رابطه مستقیمی با ارتفاع آن‌ها ندارد، پیرامون دولین‌ها رابطه معناداری با

مساحت آن‌ها داشته اما این رابطه با عمق و ارتفاع در حد کمتری است و عمق دولین‌ها در رابطه با ارتفاع آن‌ها است.

خانلری و مؤمنی (۱۳۹۱) به بررسی ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعه فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین واقع در غرب ایران و نتایج آزمایش ردیابی، سرعت متوسط جریان آب زیرزمینی در مناطقی که ماده رنگی ردیابی شده است، در محدوده‌ی سرعت حرکت آب در نواحی توسعه‌یافته کارستی قرار دارد و نشان‌دهنده‌ی حاکمیت رژیم جریان مجرای است.

وایت^۱ و وپسر^۲ (۲۰۰۳) چشم‌اندازهای کارست حاشیه‌ی فلات در غرب می‌سی‌سی‌پی را مورد پژوهش قرار داده و بیان کرده است که جریان‌های سطحی بر روی دامنه‌ها باعث گسترش درز در سنگ‌های سطحی شده است؛ و از آنجایی که آب‌های سطحی توسط مجراهایی به آب‌های زیرزمینی هدایت می‌شوند؛ در نتیجه باعث ایجاد دره‌هایی می‌شوند و با گذر زمان بر روی سازندهای آهکی پرتگاه‌ها به‌صورت تند شکل می‌گیرند برای همین زهکشی در این زمین‌ها نیز بسیار سریع است.

تانگ^۳ (۲۰۰۳) انحلال سنگ آهک در چین را در وسعت زیاد مطرح کرده است. طبق نتیجه‌گیری وی آب‌وهوای چین گرمسیری تا نیمه گرمسیری بوده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سنگ مادر به‌عنوان مهم‌ترین عامل کارستی شدن در این منطقه است.

1 white
2 Vepser
3 Tang

پلاژیک و آهک تشکیل شده از توده سنگ آهکی (سازندهای کارستی) تشکیل شده و بخشی از زاگرس رورانده در غرب ایران است. در این منطقه انواع اشکال کارستی نظیر، غار، دولین، اوولا، پن، لاپیز، اشکال لانه زنبوری، دره‌های عمیق و چشمه‌ی پر آب وجود دارند. این توده کوهستانی تا خط‌القدر، در چهار طرف با مساحت ۸۷۹/۳ کیلومتر مربع بین عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه تا ۳۴ دقیقه و ۴۴ درجه و ۴۷ دقیقه، طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۲۷ درجه و ۲۷ دقیقه واقع شد است که به وسیله دشت-های آبرفتی احاطه می‌شود. از نظر موقعیت نسبی محدوده فوق در استان کرمانشاه و شمال شهر کرمانشاه واقع شده و به ناهمواری‌های بیستون (پراو-پراَب) مشهور است (شکل شماره ۱). حداکثر ارتفاع کوه پراو ۳۳۸۵ متر و حداقل آن در دشت‌های اطراف این توده کوهستانی دارای ارتفاع ۱۴۰۰ متر است. این توده کوهستانی به تبعیت از جهت کلی زاگرس از شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده که متوسط عرض آن ۱۵ کیلومتر و طول آن ۶۰ کیلومتر است. اقلیم منطقه مطابق نتایج فرمول‌های دومارتن و آمبرژه از نوع نیمه‌خشک سرد بوده و متوسط میزان بارندگی سالانه آن ۶۰۰ میلی‌متر است. از آنجایی که این منطقه بیشتر از ۳۰۰ میلی‌متر بارندگی دریافت می‌کند به لحاظ اقلیمی مستعد شکل‌گیری اشکال کارستی است.

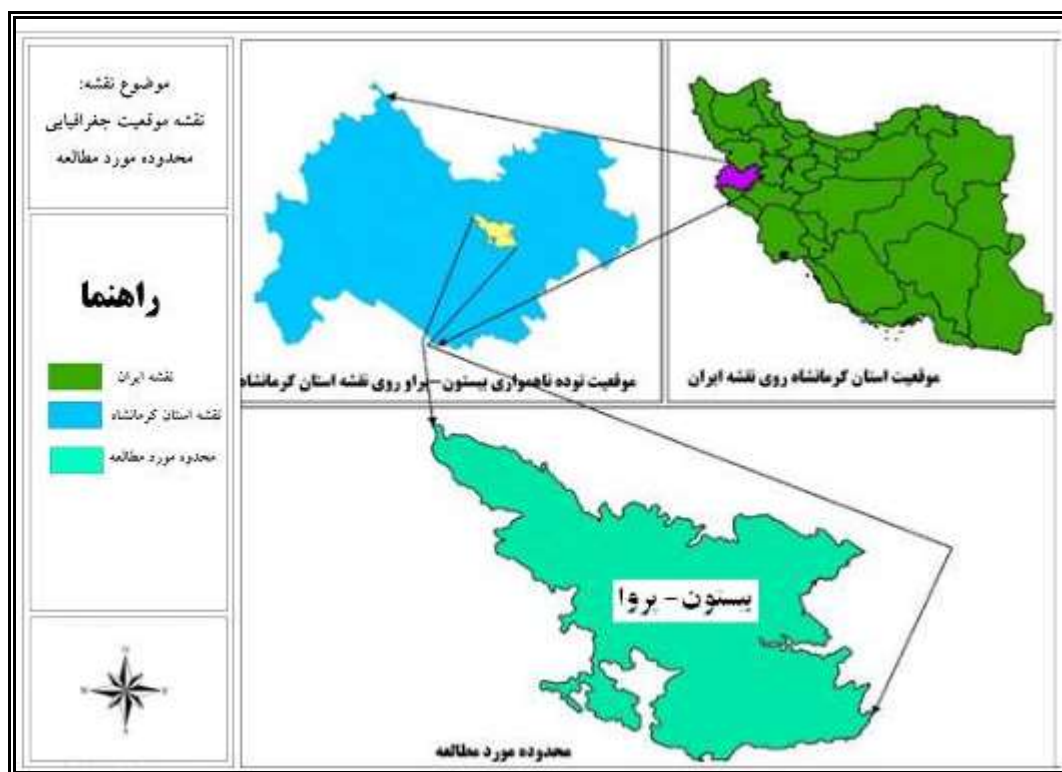
همچنین مایلر^۱ و همکاران (۲۰۰۰) به بررسی یک سفره آب زیرزمینی در منطقه کارستی در نزدیک یک مزرعه کاج پرداخته‌اند. آن‌ها استفاده از آفت‌کش‌ها در این مزرعه را دلیل آلودگی باکتریایی سفره آب مجاور آن می‌دانند. پینگزورا^۲ و همکاران (۲۰۰۸) فرونشست ناشی از کارست را به‌عنوان یک شکل مطرح کرده و بیان می‌دارند این نوع فرونشست در معادن متروکه‌ی زغال‌سنگ در شمال چین ناشی از فرونشست و سقوط ناگهانی آن‌ها است.

باتوستا^۳ و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و زدن پروفیل خاک اقدام به تهیه نقشه توزیع خاک دشت‌های آهکی جزیره یوکاتان مکزیک نمودند و عوامل مؤثر در تشکیل خاک را آب‌وهوا و نوع سنگ می‌دانند. رودریگرز و جوانج^۴ (۲۰۱۱) به توصیف پیچیدگی‌های شبکه کارستیک در مناطق آهکی اسپانیا پرداخته‌اند و با استفاده از مدل‌های هندسی به شبیه‌سازی شبکه آبخوان به‌صورت سه بعدی اقدام کرده است. نتایج این بررسی نشان داده که عامل شکستگی در سازندها با گذشت زمان موجب انحلال شیمیایی سنگ‌ها شده و باعث افزایش تخلخل ثانویه در آبخوان‌های کارستی می‌شود.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از لحاظ لیتولوژیک از آهک پلاژیک بیستون، رادیولاریت و آهک‌های مارنی، آهک

- 1 Mailer
- 2 Pingzoua
- 3 Batusta
- 4 Redringuze & Juang



شکل (۱) نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، منبع نگارندگان

جهت سنجش ارتباط معناداری بین متغیرها و نرم‌افزار Google Earth 6 برای شناسایی اشکال ژئومورفولوژی منطقه بوده است.

روش کار

بررسی نقش عوامل مؤثر در توسعه کارست و اشکال فروچاله‌ها می‌تواند در برگزیده فاکتورهای فراوانی باشد. ولی با این حال تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدامیک از عوامل تأثیر بیشتری دارند، کار دشواری است؛ بنابراین عواملی که در این پژوهش به‌عنوان متغیرهای مستقل در تشکیل ناهمواری کارستی انتخاب شدند، با توجه به نقش این عوامل در ایجاد فروچاله‌ها به‌عنوان یک عارضه کارستی حائز اهمیت در این توده کوهستانی است. سپس با استفاده

داده‌ها و اطلاعات این پژوهش از منابع مختلف شامل: اسنادی، داده‌های میدانی، داده‌های کامپیوتری و در بسیاری موارد استخراج از نقشه‌ها و شناسایی اطلاعات از روی داده‌های اولیه جمع‌آوری، ثبت و کدگذاری شده‌اند. از جمله داده‌های مورد استفاده در پژوهش شامل نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ جهت شناسایی وضعیت توپوگرافی منطقه و مشخص کردن محدوده مورد پژوهش، نقشه زمین‌شناسی استان کرمانشاه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ جهت بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه؛ نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه و میانراهان برای تهیه نقشه گسل‌های منطقه بوده است. ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش نرم‌افزار Arc GIS10 برای ایجاد بانک داده‌های اطلاعاتی و ترسیم نقشه، نرم‌افزار SPSS

از مطالعات اسنادی و میدانی اقدام به تدقیق متغیرهای موردنظر و شاخص‌های اندازه‌گیری آن‌ها شد. فاکتورهای انتخاب شده در تشکیل استعداد وقوع فروچاله‌ها، ابتدا در ارتباط باهم و با یک مدل انتزاعی اولیه ارزیابی شدند و در مرحله بعد به جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات هرکدام پرداخته شده و برای مرحله تجزیه و تحلیل آماده شدند. تحلیل اولیه از داده‌های به دست آمده به صورت پردازش آن‌ها در محیط GIS و تشکیل لایه‌های اطلاعاتی به صورت یکسان‌سازی و طبقه‌بندی به منظور استفاده در محیط SPSS است.

بنابراین ابتدا تمام لایه‌های مربوط به متغیرها در محیط نرم‌افزار Arc GIS به صورت رستری و با ژئورفرنس یکسان استخراج شدند که در این حالت تمام پیکسل‌ها در لایه‌های اطلاعاتی، دارای اندازه یکسان و ارزش ویژه خود شدند. با توجه به وسعت زیاد منطقه مورد مطالعه، ژئورفرنسی با اندازه پیکسل‌های ۱۵۰ متر برای محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شد. با این اندازه تعداد رکوردهای موجود در ناهمواری‌های بیستون- پراو برای هر لایه اطلاعاتی برابر با ۲۷۹۳۰ پیکسل بوده است.

در میان متغیرهای مستقل، لایه کیفی مربوط به زمین‌شناسی با در نظر گرفتن نوع لایه و تأثیری که در تشکیل فروچاله‌ها دارد به ترتیب میزان اهمیت هر سازند با اعمال وزن ۱ تا ۵ تبدیل به یک لایه کمی شده است؛ بدین معنی که سازندی که بیشترین اهمیت را در تشکیل فروچاله‌ها داشته ارزش ۵ و سازند

دارای اهمیت کمتر ارزش ۱ اختصاص داده شده است، اما از آنجاکه لایه‌های دیگر مربوط به متغیرهای مستقل (ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، جهت دامنه، دما و بارش) خود دارای ارزش کمی بودند، فقط با در نظر گرفتن میزان ارزش، به ۵ طبقه تقسیم‌بندی شدند. لایه کیفی متغیر وابسته فروچاله‌ها نیز با تبدیل به نقشه ۰ و ۱ به لایه کمی تبدیل شد. بنابراین مناطقی که در آن‌ها فروچاله‌ها شکل گرفته‌اند، ارزش ۱ و قسمت‌های دیگر که فروچاله ندارند ارزش صفر اختصاص داده شد. در نهایت تمام لایه‌های اطلاعاتی، شامل لایه‌های مربوط به متغیرهای مستقل و لایه مربوط به متغیر وابسته برای اجرای مدل رگرسیونی، از محیط GIS به محیط نرم‌افزار SPSS 19 منتقل شدند.

در روش پژوهش برای تحلیل رگرسیون خطی، از مدل گام‌به‌گام استفاده شده است. در این روش متغیرهای پیش‌گویی کننده (مستقل) تک‌به‌تک به معادله اضافه شدند و به دنبال آن اگر نقش معناداری در رگرسیون نداشته باشد، از آن حذف می‌شوند. در بحث‌های آماری، سطح معناداری (sig) به میزان ۰/۰۵ تنظیم می‌شود. بنابراین چنانچه این سطح، برای متغیری بیش از ۵ درصد باشد، متغیر موردنظر معنادار نبوده و از معادله حذف می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل اولیه از مدل رگرسیون خطی به صورت جدول ۱ است.

جدول (۱) الگوی حاصل از پرونداد رگرسیون خطی چندگانه

خلاصه مدل					
(خطای معیار برآورد) Std. Error of the Estimate	(ضریب تعیین تعدیل شده) Adjusted R Square	(ضریب تعدیل) R Square	(ضریب همبستگی) R		(مراحل) مدل‌ها
۰/۲۰۵	۰/۳۹۴	۰/۳۹۴	۰/۶۲۷	(a)	۱
۰/۱۸۱	۰/۵۲۴	۰/۵۲۴	۰/۷۲۴	(b)	۲
۰/۱۷۴	۰/۵۶۳	۰/۵۶۳	۰/۷۵۱	(C)	۳
۰/۱۷۴	۰/۵۶۳	۰/۵۶۳	۰/۷۵۱	(D)	۴
۰/۱۶۳	۰/۶۱۶	۰/۶۱۶	۰/۷۸۵	(e)	۵
۰/۱۵۲	۰/۶۶۴	۰/۶۶۴	۰/۸۱۷	(f)	۶
۰/۱۵۰	۰/۶۷۴	۰/۶۷۴	۰/۸۲۱	(g)	۷
۰/۱۴۹	۰/۶۷۹	۰/۶۷۹	۰/۸۲۴	(h)	۸
۰/۱۴۹	۰/۶۸۱	۰/۶۸۱	۰/۸۲۵	(i)	۹
a. Predictors: (Constant), Rain b. Predictors: (Constant), Rain, Geology c. Predictors: (Constant), Rain, Geology, Temperature d. Predictors: (Constant), Geology, Temperature e. Predictors: (Constant), Geology, Temperature, Aspect f. Predictors: (Constant), Geology, Temperature, Aspect, Height g. Predictors: (Constant), Geology, Temperature, Aspect, Height, Fault h. Predictors: (Constant), Geology, Temperature, Aspect, Height, Fault, Slope i. Predictors: (Constant), Geology, Temperature, Aspect, Height, Fault, Slope, Rain					

رابطه قوی تفسیر می‌شود. در مرحله سوم، متغیر دما به مدل اضافه شده و نتیجه تأثیر سه متغیر با ضریب همبستگی یا R به ۰/۷۵۱ می‌رسد. در چهارمین مرحله پس از اضافه شدن متغیر دما به مدل، مشخص شد که در این ترکیب تأثیر بارش از بین رفته و بهترین ترکیب سنجش دو متغیر دما و ساختار زمین‌شناسی است. سیستم به صورت خودکار عامل بارش را حذف کرده و دو متغیر ساختار زمین‌شناسی را با دما مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه با مقدار R به میزان ۰/۷۵۱ که همان برابر با مرحله پیشین است، به دست می‌آید. یعنی سنجش لایه بارش در یک زمان با لایه دما و ساختار زمین‌شناسی برابر با میزان تأثیر دو لایه همان

در جدول فوق، خلاصه الگوی مورد استفاده و میزان R یا ضریب همبستگی چندگانه نشان داده شده است. مقدار این ضریب بین صفر تا یک بوده و تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته را در نه مرحله به صورت فوق نشان می‌دهد. در مرحله اول متغیر بارش وارد مدل شده و تأثیر آن نسبت به تشکیل فروچاله‌ها با توجه به میزان R به میزان ۰/۶۲۷ برآورد می‌شود که بر اساس تخمین قوت، دارای رابطه قوی است. در مرحله دوم با دخالت متغیر ساختار زمین‌شناسی، مدل به صورت دو متغیر مستقل و یک متغیر وابسته مورد سنجش قرار می‌گیرد و میزان این رابطه به ۰/۷۲۴ افزایش می‌یابد و باز هم به صورت

دما و ساختار زمین‌شناسی است. و چون در ترکیب این سه لایه تأثیر آن خنثی می‌شود، این متغیر در مرحله چهارم کنار گذاشته می‌شود. چون هدف فرایند فوق معرفی ترکیب بهینه متغیرها در ارزیابی میزان همبستگی با متغیر وابسته است. مرحله پنجم با سه متغیر ساختار زمین‌شناسی، دما و جهات شیب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نتیجه ضریب همبستگی به میزان $0/785$ رسیده و در تخمین قوت، به صورت رابطه قوی ظاهر می‌شود.

مرحله ششم از مدل فوق، ارزیابی چهار متغیر ساختار زمین‌شناسی، دما، جهات شیب و ارتفاع است. در این مرحله میزان ضریب همبستگی برابر با $0/817$ بوده و آن نمایانگر رابطه بسیار قوی است. در مرحله هفتم، متغیر گسل به چهار متغیر مرحله ششم اضافه شده و در نتیجه میزان این ضریب همبستگی به $0/821$ می‌رسد. به ترتیب در مرحله هشتم آخرین متغیر مستقل که لایه اطلاعاتی شیب است وارد مدل شده و باز هم ضریب همبستگی افزایش یافته و به میزان $0/824$ می‌رسد و این نشان‌دهنده رابطه بسیار قوی بین شش متغیر، ساختار زمین‌شناسی، دما، جهات شیب، ارتفاع، گسل و درصد شیب است. آخرین مرحله تأثیر کل متغیرها به صورت یکجا در متغیر وابسته فروچاله‌ها بوده که نتیجه آن باز هم افزایش ضریب همبستگی به میزان $0/825$ بوده و در این مرحله با تأثیر بسیار کم بارش، باز هم این متغیر دخالت داده شده و از حذف آن صرفه نظر می‌شود.

ستون سوم از برونداد جدول دوم رگرسیون خطی، R Square یا R^2 است. R^2 که به آن ضریب تعدیل نیز گفته می‌شود از میزان R به دست آمده و مقدار

تغییرپذیری را نشان می‌دهد؛ یعنی با ورود متغیرها به مدل میزان ضریب همبستگی یا R اضافه می‌شود و به ۱ که همبستگی کامل است نزدیک می‌شود؛ اما زمانی که تمام متغیرها وارد مدل می‌شوند و این ضریب به ۱ یا همبستگی کامل نمی‌رسد به این معنی است که عوامل دیگری غیر از متغیرهای مستقل مورد نظر در وقوع متغیر وابسته دخالت دارند که در این پژوهش به آن‌ها پرداخته نشده است. البته اشکال وارد بر این ضریب این است که در آن میزان درجه آزادی منظور نمی‌گردد و به همین دلیل برای رفع این اشکال از ضریب تعیین تعدیل شده یا Adjusted R Square استفاده می‌شود. در این تحلیل به دلیل اینکه درجه آزادی برابر با ۱ است، میزان این ضریب تعیین تعدیل شده با R^2 برابر است.

ستون آخر از برونداد رگرسیون در این مرحله مقدار خطای معیار برآورد یا Std. Error of the Estimate است. این مقدار، خطای مراحل مدل را کنترل می‌کند و میزان آن نباید بیشتر از ۵ درصد برسد. با توجه به ستون مقدار خطای معیار برآورد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد متغیرها میزان خطای برآورد شده کمتر می‌شود و در نتیجه به اعتبار کارایی مدل افزوده می‌شود.

جدول (۲) میزان F محاسبه شده و سطح معنی‌داری آزمون با توجه به درجه آزادی است. مجموع مربعات، درجات آزادی و مربع میانگین برای دو مورد از منابع تغییر، یعنی رگرسیون و Residual از محتویات دیگر این جدول است. خروجی رگرسیون، اطلاعات راجع به تغییر که برای مدل پژوهش در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. خروجی Residual اطلاعات

در سطح اطمینان ۹۹ درصد پذیرفته شده و فرضیه صفر رد می‌شود. استدلال مورد نظر در این مرحله سطح معناداری بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته است که به میزان ۸۵۲۵,۴۰۵ مقدار برای آزمون F است.

راجع به تغییر که برای مدل مورد نظر در نظر گرفته نشده است را نشان می‌دهد و خروجی Total جمع اطلاعات مربوط به Regression و Residual است. در خروجی پژوهش میزان آزمون F با توجه به مرحله نه که مدل مورد استفاده در پژوهش است نتایج آزمون

جدول (۲) میزان F محاسبه شده و سطح معناداری آزمون منبع نگراندگان

ANOVA ¹						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
۱	Regression	۷۶۰/۹۸۲	۱	۷۶۰/۹۸۲	۱۸۱۴۱/۱۴۵	۰/۰۰۰
	Residual	۱۱۷۱/۸۱۳	۲۷۹۳۵	۰/۰۴۲		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۲	Regression	۱۰۱۳/۷۱۴	۲	۵۰۶/۸۵۷	۱۵۴۰۵/۱۲۹	۰/۰۰۰
	Residual	۹۱۹/۰۸۰	۲۷۹۳۴	۰/۰۳۳		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۳	Regression	۱۰۸۸/۹۳۷	۳	۳۶۲/۹۷۹	۱۲۰۱۵/۱۸۲	۰/۰۰۰
	Residual	۸۴۳/۸۷۰	۲۷۹۳۳	۰/۰۳۰		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۴	Regression	۱۲۸۸/۶۴۷	۲	۵۴۴/۴۶۲	۱۸۰۲۲/۹۴۰	۰/۰۰۰
	Residual	۶۴۴/۱۴۷	۲۷۹۳۴	۰/۰۳۰		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۵	Regression	۱۲۸۸/۶۴۷	۳	۳۹۷/۰۴۵	۱۴۹۵۳/۸۷۵	۰/۰۰۰
	Residual	۶۴۴/۱۴۷	۲۷۹۳۳	۰/۰۲۷		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۶	Regression	۱۳۰۳/۲۱۶	۴	۳۲۲/۱۶۲	۱۳۹۶۹/۸۲۵	۰/۰۰۰
	Residual	۶۲۹/۵۷۸	۲۷۹۳۲	۰/۰۲۳		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۷	Regression	۱۳۰۳/۲۱۶	۵	۲۶۰/۶۴۳	۱۱۵۶۳/۳۴۲	۰/۰۰۰
	Residual	۶۲۹/۵۷۸	۲۷۹۳۱	۰/۰۲۳		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۸	Regression	۱۳۱۱/۴۸۸	۶	۲۱۸/۵۸۱	۹۸۲۶/۰۴۶	۰/۰۰۰
	Residual	۶۲۱/۳۰۶	۲۷۹۳۰	۰/۰۲۲		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			
۹	Regression	۱۳۱/۶۲۱	۷	۱۸۸/۰۸۹	۸۵۲۵/۴۰۵	۰/۰۰۰
	Residual	۶۱۶/۱۷۳	۲۷۹۲۹	۰/۰۲۲		
	Total	۱۹۳۲/۷۹۴	۲۷۹۳۶			

مقدار آن‌ها پس از تبدیل نمره‌ها به یک نمره معیار بیان می‌گردد. در تحلیل مسیر میزان بتا برای تعیین اثرهای مستقیم متغیرها از اهمیت بالایی برخوردار است. ضرایب استاندارد نشده، ضرایب مدل رگرسیون برآورد شده هستند. اغلب متغیرهای مستقل در واحدهای مختلف سنجش می‌شوند. ضرایب استاندارد شده یا بتا (Beta) برای سنجش پذیرتر کردن ضرایب رگرسیون است. در نهایت پس از ورود پنج متغیر زمین‌شناسی و سازند، فاصله از گسل، شیب، جهات شیب، ارتفاع، دما و بارش به‌عنوان متغیرهای مستقل و متغیر فروچاله به‌عنوان متغیر وابسته، نتایج جدول (۳) حاصل از مدل رگرسیونی به دست آمد.

یکی از خروجی مدل رگرسیون خطی مربوط به پیش‌بینی است و در آن مقدار ثابت یا (Constant) a و مقدار b (Beta) که به ترتیب برای متغیرهای مستقل مقدار ثابت می‌آیند به نمایش در می‌آید و بر این اساس می‌توان معادله پیش‌بینی خود را نوشت. ستون دیگری که در این جدول از اهمیت بالایی برخوردار است، ستون مربوط به میزان بتا (Beta) یا ضرایب استاندارد شده است؛ اگر سعی شود متغیرهای مورد نظر که هیچ سنجشی باهم ندارند از نظر میزان تأثیر بر متغیر وابسته باهم مقایسه شود، از این ضرایب استفاده می‌شود. بتا میزان تأثیر بدون توجه به شاخص است و در آن همه متغیرها از نظر شاخص آزاد می‌گردند و

جدول (۳) پیش‌بینی تأثیرات متغیرها و انتخاب مقدار ثابت a و مقدار b

Coefficients ^a					
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-۰/۱۲۲	-۰/۰۰۴		-۲۹/۴۸۰	/۰۰۰
Rain	۰/۰۳۹	۰/۰۰۳	۰/۱۵۹	-۱۵/۲۵۲	۰/۰۰۰
Geology	۰/۰۵۷	۰/۰۰۱	۰/۴۰۵	-۶۳/۲۷۶	۰/۰۰۰
Temperature	۰/۱۲۰	۰/۰۰۴	۰/۴۴۴	۲۸/۰۵۰	۰/۰۰۰
Aspect	-۰/۱۲۶	۰/۰۰۲	-۰/۶۷۰	-۸۳/۵۷۷	۰/۰۰۰
Height	۰/۱۶۹	۰/۰۰۲	۰/۷۲۵	۶۸/۴۷۲	۰/۰۰۰
Fault	۰/۰۵۵	۰/۰۰۲	۰/۲۷۲	۲۵/۱۱۳	۰/۰۰۰
Slope	۰/۰۸۴	۰/۰۰۴	۰/۳۲۱	۲۰/۲۰۱	۰/۰۰۰

a. Dependent Variable: فروچاله

همبستگی‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد قابل قبول بوده و هیچ‌یک از آن‌ها در مرحله نهم از معادله حذف نمی‌شوند. از طرفی میزان اهمیت هر متغیر در معادله

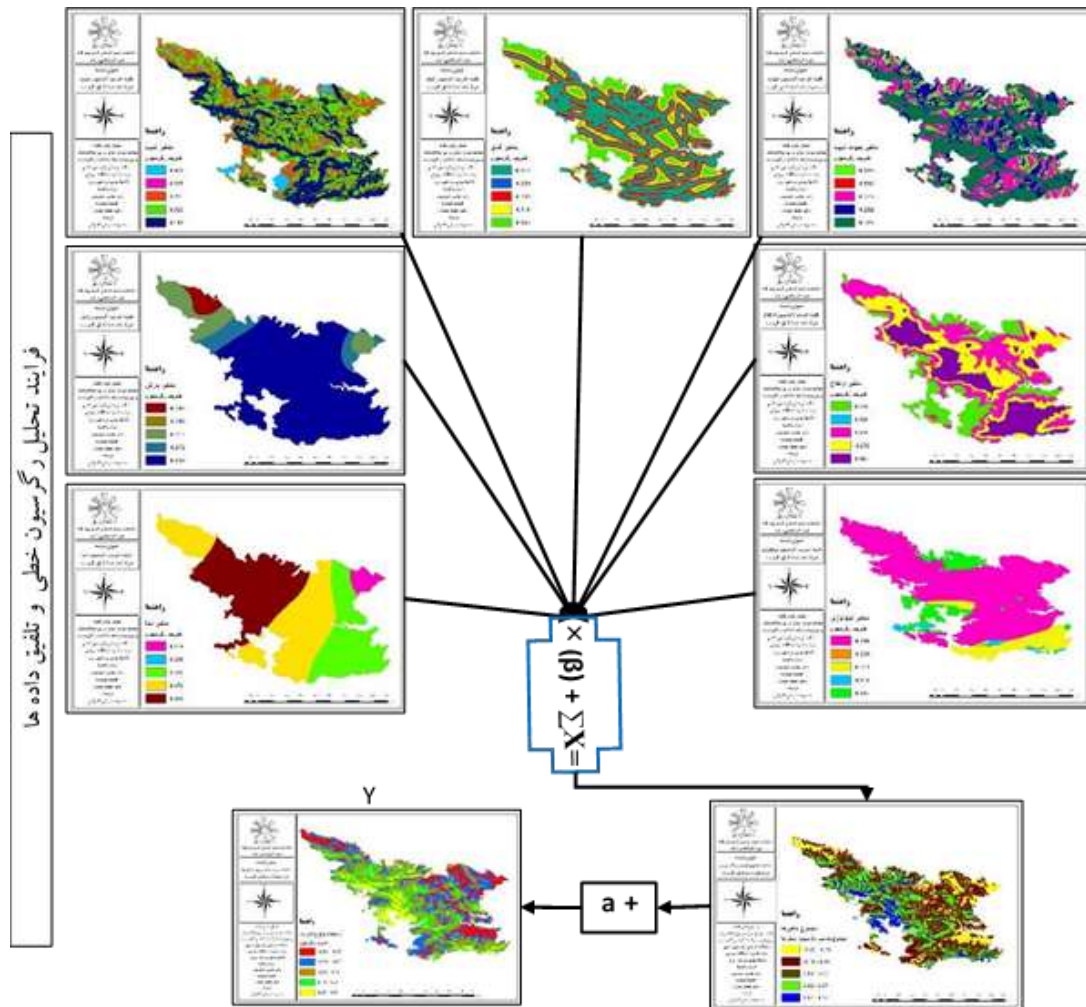
با توجه به نتایج به دست آمده تمام متغیرها به دلیل همبستگی بالایی که دارند در تشکیل فروچاله‌ها دخیل می‌باشند و با توجه به میزان sig این میزان

بر اساس ضریب استاندارد β تعیین می‌شود. ضریب بتا (β) نشان‌دهنده میزان تغییر متغیر وابسته (بر اساس واحد انحراف معیار) به ازای تغییر به‌اندازه یک انحراف معیار در متغیر مستقل است. هر چه میزان این ضریب برای هر متغیر بزرگ‌تر باشد، به مفهوم همبستگی بیشتر و اهمیت بیشتر آن متغیر است. همچنین ضریب منفی β بدین معناست که متغیر مستقل به‌صورت معکوس بر متغیر وابسته تأثیر دارد. برای نمونه، متغیر شیب هر چه کمتر باشد تأثیر بیشتری بر متغیر وابسته (شکل‌گیری فروچاله‌ها) دارد و ضریب بتای آن نیز منفی است. در ناهمواری‌های بیستون پراو به ترتیب، متغیرهای بارش با ضریب بتای ۰/۱۵۹، متغیر ساختار زمین‌شناسی با ضریب بتای ۰/۴۰۵، متغیر دما با ضریب بتای ۰/۴۴۴، متغیر جهات شیب با ضریب بتای ۰/۶۷۰، متغیر ارتفاع با ضریب بتای ۰/۷۲۵، متغیر گسل با ضریب بتای ۰/۲۷۲ و متغیر شیب با ضریب بتای ۰/۳۲۱ مشخص شده و اهمیت هر کدام در ضریب رگرسیون استاندارد شده یا بتا می‌باشند. در نهایت با توجه به ضرایب رگرسیونی به دست آمده β (ضریب رگرسیونی ثابت و ضریب رگرسیونی هر متغیر) که از آن با عنوان ضرایب استاندارد نشده نام می‌شود، معادله احتمال شکل‌گیری فروچاله‌ها برای ناهمواری‌های بیستون-پراو به دست

می‌آید. ضریب ثابت رگرسیونی برای منطقه مورد مطالعه که به معادله اضافه می‌شود مقدار ۰/۱۲۲- است و ضریب رگرسیونی متغیرهای بارش، ساختار زمین‌شناسی، دما، جهات شیب، ارتفاع، گسل و شیب به ترتیب برابر با ۰/۰۳۹، ۰/۰۵۷، ۰/۱۲۰، ۰/۱۲۶-، ۰/۱۶۹، ۰/۰۵۵ و ۰/۰۸۴ است. بنابراین معادله احتمال وقوع فروچاله برای ناهمواری‌های بیستون-پراو به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد: رابطه ۱:

$$\begin{aligned} \text{استعداد وقوع فروچاله} = & (-0/122) + (\text{بارش} \times 0/039) \\ & + (\text{شیب} \times 0/084) + (\text{گسل} \times 0/055) + (\text{جهت} - \\ & \text{شیب} \times 0/126) + (\text{دما} \times 0/120) + (\text{زمین‌شناسی} \times 0/057) \\ & + (\text{ارتفاع} \times 0/169) \end{aligned}$$

ضرایب به دست آمده در معادله رگرسیونی برای ۲۷۹۳۶ شبکه محدوده مورد مطالعه محاسبه شده و نتایج معادله مذکور برای تجزیه و تحلیل در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و تهیه نقشه احتمال نهایی وقوع فروچاله‌ها، وارد محیط نرم‌افزاری Arc GIS شد. داده‌های ورودی پس از درونیابی با استفاده از Raster calculate، تبدیل به نقشه اولیه احتمال وقوع فروچاله شده و خروجی نهایی نیز در محیط Arc گرفته شد. فرایند مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱) فرایند تحلیل رگرسیون و ترکیب داده‌ها در استعداد ایجاد فروچاله‌ها

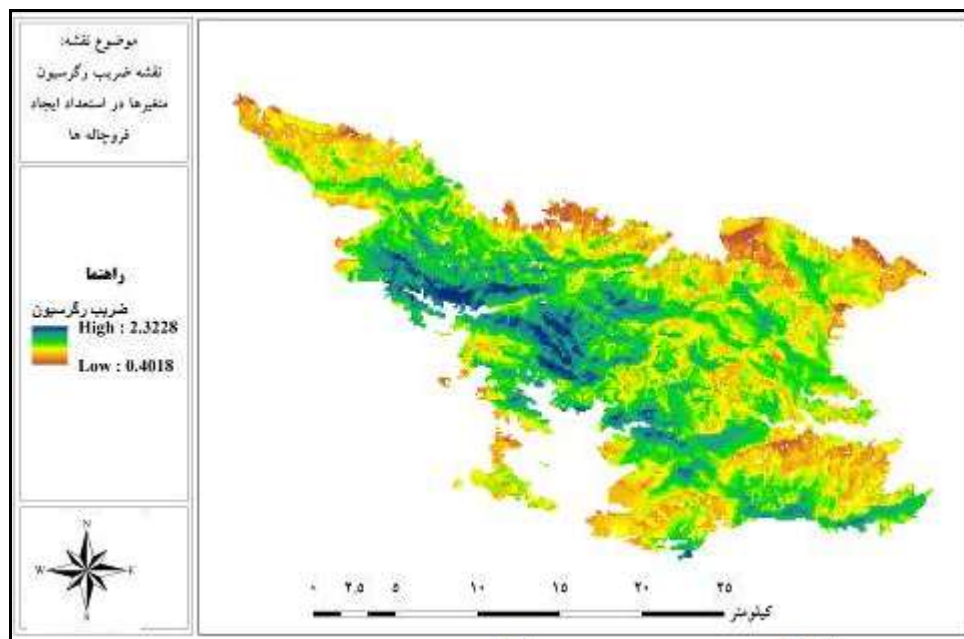
یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از معادله رگرسیونی یا به گفته‌ای نتیجه حاصل از تأثیر دادن ضرایب رگرسیونی متغیرها در ماتریس داده‌ها بر اساس روابط فوق (استعداد وقوع فروچاله‌ها) به صورت دسته‌ای از اعداد مثبت و منفی در آمده است. اعداد مثبت بیانگر وجود شرایط لازم برای توسعه کارست و اعداد منفی و متمایل به صفر، بیانگر نبودن شرایط مناسب برای توسعه کارست است که پیش‌تر به آن اشاره شد. در جاهایی که به طور هم‌زمان تعدادی از متغیرها یا تمام آن‌ها شرایط

لازم را نداشته باشند، نتایج منفی و نزدیک به صفر هستند. بنابراین چنانچه شیب زیاد، ارتفاع کم، بارش اندک، دمای بالا، فاصله از گسل زیاد، جهت شیب رو به آفتاب و سازند زمین‌شناسی برای توسعه کارست نامناسب بوده، نتایجی منفی و متمایل به صفر به دست آمده است که به مفهوم نبود شرایط لازم برای توسعه فروچاله‌ها در آن پهنه‌هاست. در ناهمواری‌های بیستون پرآو دامنه نتایج عددی حاصل از تأثیر دادن ضرایب رگرسیونی، در ماتریس داده‌ها بین ۰/۴۰۱ تا ۲/۳۲۲ است که این دامنه، بر اساس موقعیت فروچاله‌ها و

نقشه استعداد توسعه کارست در ناهمواری‌های بیستون-پراو، ارایه شده است (شکل ۳).

شناختی که از منطقه به دست آمده، به صورت کیفی و در پنج کلاس از استعداد بسیار زیاد تا بسیار کم دسته‌بندی شده است و در چهارچوب جدول (۴) و



شکل (۳) نقشه نهایی ضریب رگرسیون متغیرها در استعداد ایجاد فروچاله‌ها

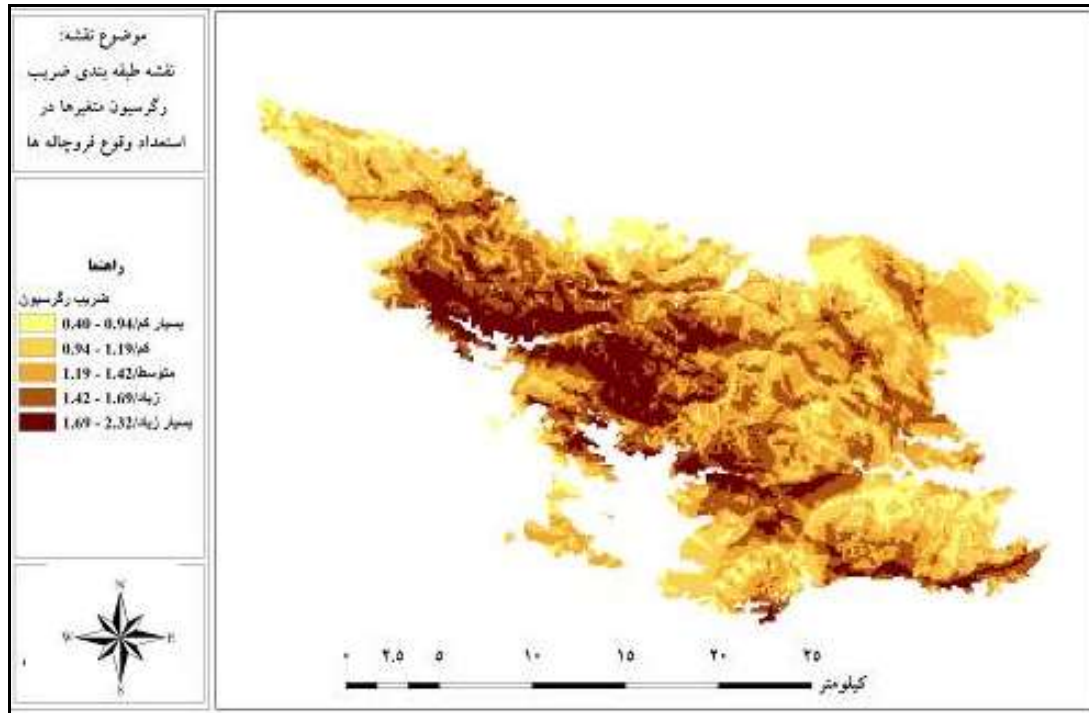
کارست در منطقه با توجه به میزان تأثیرگذاری یا ضریب رگرسیون انجام شده و به صورت شکل ۴ ارایه می‌شود.

طبقه‌بندی میزان تأثیرگذاری و تقسیم آن‌ها به سطوح مختلف به منظور اولویت‌بندی از تأثیر متغیرهای مستقل یکی از برآیند پژوهش حاضر است؛ بنابراین با توجه به جدول زیر، طبقه‌بندی توسعه

جدول (۴) استعداد توسعه کارست در ناهمواری‌های بیستون - پراو

استعداد وقوع فروچاله‌ها	دسته‌بندی کیفی
۰/۴۰۱ - ۰/۹۴۴	بسیار کم
۰/۹۴۴ - ۱/۱۹۲	کم
۱/۱۹۲ - ۱/۴۲۶	متوسط
۱/۴۲۶ - ۱/۶۹۷	زیاد
۱/۶۹۷ - ۲/۳۲۲	بسیار زیاد

با توجه به جدول فوق نقشه استعداد وقوع فروچاله‌ها در پنج طبقه به صورت شکل (۴) نشان داده می‌شود.



شکل (۴) نقشه طبقه‌بندی شده ضریب رگرسیون متغیرها در استعداد وقوع فروچاله

قلدسشیدر^۱، ۲۰۰۹: ۴۰۶). هدف نقشه‌های حساسیت، به ویژه در ارتباط با منابع آب زیرزمینی، مشخص کردن مناطق بسیار حساس و اولویت‌بندی آنهاست. یک نقشه حساسیت ممکن است به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا به شیوه‌ی علمی، توازنی بنیادین بین حفاظت از منابع آب زیرزمینی و جنبه‌های مختلف اجتماعی اقتصادی بیابد (گلدسشاید^۲، ۲۰۰۵: ۵۵۶). در این بخش از بررسی با توجه به نتایج حاصل از مدل رگرسیونی اجرا شده برای منطقه کارستی و بر اساس نقشه‌های استعداد توسعه کارست، نقشه

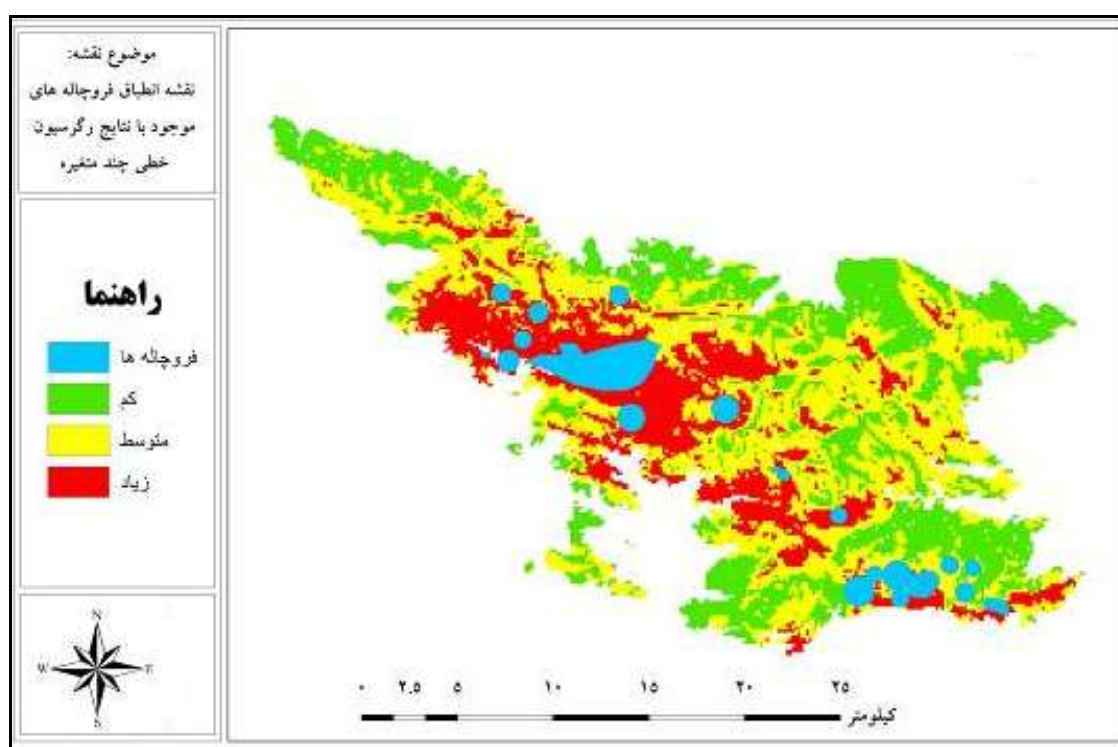
پس از تهیه نقشه استعداد وقوع فروچاله‌ها، برای ارزیابی نتایج به دست آمده، نقشه فروچاله محدوده مورد مطالعه با نقشه استعداد وقوع حاصل از متغیرهایی مستقل، مورد هم‌پوشانی قرار می‌گیرد. بر این اساس نقشه فروچاله‌ها با بخش‌هایی که حداکثر احتمال وقوع فروچاله‌ها را نشان می‌دهند، مطابقت دارند و این نشان‌دهنده کارایی و اعتبار مدل رگرسیون خطی چند متغیره در سنجش تأثیرات متغیرهای مورد نظر است. نقشه‌های حساسیت، طرح‌های ساده‌ای از شرایط طبیعی هستند که قابلیت اطمینان آنها بسته به در دسترس بودن، کیفیت و تفسیر داده‌هاست (راور و

1 Raver and Goldschieder

2 Goldschieder

عوامل تأثیرگذار در به وجود آمدن یکی از اشکال کارستی از جمله فروچاله‌ها است. در این مرحله از پژوهش حاضر با استفاده از این مدل متغیرهای مورد نظر که شامل هفت متغیر مستقل و یک متغیر وابسته بود مورد ارزیابی قرار گرفت و خروجی حاصل از آن به صورت نقشه استعداد وقوع فروچاله‌ها برای منطقه بیستون - پراو ارایه شد.

حساسیت کارست در سه طبقه حساسیت زیاد، متوسط و حساسیت کم ارایه شده است (شکل ۵). بخش‌هایی که در طبقه حساسیت زیاد هستند با محدوده استعداد بسیار زیاد و زیاد انطباق داشته و مطابق با استعداد وقوع فروچاله‌ها هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل رگرسیون خطی چند متغیره ابزار مناسبی در جهت ارزیابی



شکل (۵) نقشه تطابق فروچاله‌ها با نقشه استعداد وقوع فروچاله‌ها

کارستی است. بررسی‌ها و کنترل‌های میدانی و بعلاوه گردآوری اطلاعات مربوطه، این امر را تأیید می‌کنند. بررسی عارضه فروچاله در محدوده مورد مطالعه به‌عنوان یکی از تپیک‌ترین اشکال کارستی تحت تأثیر تمام عوامل مؤثر مطرح‌شده جهت شکل‌گیری و توسعه قرار دارد؛ همان‌طور که در جدول (۲) مشخص گردید میزان F با توجه به مقدار sig در تمام

بحث و بررسی

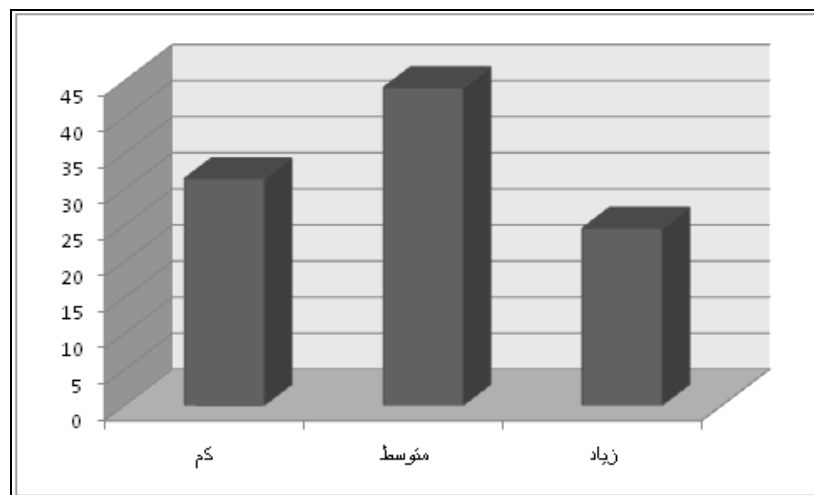
در پژوهش حاضر نتایج حاصل از مدل رگرسیونی چند متغیره و نقشه‌های پهنه‌بندی تحول و حساسیت کارست بر اساس عوامل طبیعی مؤثر با واقعیت‌های ناهمواری‌های بیستون - پراو انطباق زیادی را نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهنده کارایی بالای این مدل جهت بررسی موضوع مطرح‌شده در این منطقه

بعدی قرار می‌گیرند. با توجه به میزان ضرایب به دست آمده می‌توان این منطقه را به صورت جدول (۵) و شکل (۶) طبقه‌بندی کرده و میزان حساسیت آن‌ها را نشان داد. با توجه به جدول فوق ۲۴,۵۵ درصد از مساحت منطقه در محدوده‌ی حساسیت زیاد، ۴۴,۰۲ درصد دارای حساسیت متوسط و ۳۱,۴۲ درصد دارای حساسیت کم است. با توجه به جدول فوق نمودار توزیع سطوح مختلف حساسیت به کارست بر اساس درصد مساحت در منطقه بیستون-پراو نشان داده می‌شود.

مراحل معنی‌دار است و چون در مرحله ۹ تأثیر کل متغیرها مورد سنجش قرار می‌گیرد، و میزان sig نیز رابطه بین متغیر وابسته فروچاله‌ها و متغیرهای مستقل را معنی‌دار نشان می‌دهد، معیارهای انتخابی در تشکیل فروچاله‌های بیستون-پراو دخالت مستقیم دارند اما شدت همبستگی آن‌ها باهم فرق دارد. مثلاً عامل ارتفاع با میزان بتای ۰/۷۲۵ بیشترین تأثیر را نسبت به سایر عوامل در تشکیل فروچاله‌ها در این منطقه دارد و سپس دما و عامل ساختار زمین‌شناسی منطقه به ترتیب با ضریب بتای ۰/۴۴۴ و ۰/۴۰۵ در اولویت‌های

جدول (۶) توزیع حساسیت کارست در بیستون-پراو

درصد	مساحت (مترمربع)	تعداد پیگسل	مقیاس کیفی
۳۱/۴۲	۲۷۶۵۱۸۱۳۴	۶۶۷۱	کم
۴۴/۰۲	۳۸۷۳۹۸۹۶۳	۹۳۴۶	متوسط
۲۴/۵۵	۲۱۶۰۸۲۹۰۱	۵۲۱۳	زیاد
۱۰۰	۸۸۰۰۰۰۰۰۰	۲۱۲۳۰	کل



شکل (۶) نمودار توزیع سطوح مختلف حساسیت به کارست بر اساس درصد مساحت

نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادها

اهمیت پدیده کارست و ذخایر کارستیک موجب شده تا در سه دهه گذشته توجه ویژه‌ای به این پدیده گردد؛ که از آن جمله می‌توان به تأسیس مرکز ملی مطالعات و پژوهش‌های کارست ایران در شیراز و ایجاد دفتر مطالعات و پژوهش‌های کارست غرب کشور در کرمانشاه اشاره کرد. با توجه به اهمیت ناهمواری‌های بیستون- پرآو به‌عنوان یکی از تپیک‌ترین پهنه‌های کارستی در ایران و جهان و مطرح بودن تمام مزایا و مضرات مربوط به این پهنه‌ها و نقش آن در زندگی ساکنان اطراف این توده کوهستانی به‌منظور استفاده بهتر از منابع این پهنه‌ها و ممانعت از خطرات مربوط به پهنه‌های کارستی و از جمله این توده کارستی پیشنهادهای زیر ارایه می‌گردد:

۱- مدل رگرسیون خطی چند متغیره با توجه به ماهیت آن، از جمله مدل‌های آماری است که می‌تواند در مطالعات کمی جغرافیایی و از جمله بررسی‌های پیرامون پهنه‌های کارستی مورد استفاده قرار گیرد؛ لذا پیشنهاد می‌گردد که بررسی عوامل مؤثر در پهنه‌های کارستی و پهنه‌بندی حساسیت این مناطق بر اساس این عوامل، با استفاده از سایر روش‌های آماری نظیر شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی در منطقه مورد مطالعه انجام شود و نتایج با مدل رگرسیون خطی چند متغیره مقایسه گردد.

۲- همان‌طور که در بحث تئوری نیز آمده است وجود عامل رطوبت از شرط‌های اولیه و عوامل اصلی در بحث ایجاد و توسعه و تحول کارست است. در این پژوهش به‌منظور تهیه این لایه، لایه بارش سالیانه مورد استفاده قرار گرفته است. هرچند با در نظر گرفتن

با توجه به فراوانی و تنوع بالای عوارض کارستی در این منطقه و ارزش‌های علمی، اقتصادی و فرهنگی آن‌ها، ضروری است که تعریف مشخصی از چگونگی بهره‌برداری و حفاظت از این پهنه‌ها تعیین گردد؛ از طرفی با توجه به مطالعات پیشین و بررسی سندرم‌های کارستی در ناهمواری‌های بیستون - پرآو و بررسی عوامل مداخله‌گر انسانی از سوی دیگر، مشخص می‌شود که کارست‌های بیستون - پرآو در معرض آسیب بالایی قرار دارند. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر نقشه حساسیت کارست منطقه بر اساس عامل‌های ژئومورفولوژی تهیه شده است، می‌تواند برای مسئولان و تصمیم‌گیرندگان در این زمینه مفید واقع گردد. از سویی در راستای بهره‌برداری و حفاظت از لندفرم‌های کارستی و تعیین ضوابط و مقررات خاص پیرامون آن، نقشه حساسیت کارست منطقه می‌تواند به مسئولین امر کمک فراوان نماید. همچنین در حفاظت از مناطق دارای حساسیت متوسط و کم و جلوگیری از وارد شدن آن‌ها به پهنه‌های با حساسیت بالا و در معرض خطر حائز اهمیت فراوان است. واضح است فعالیت‌های انسانی، شامل هرگونه ساخت‌وساز، احداث جاده، معدن، چرای بی‌رویه، تولید زیاله در محدوده دارای حساسیت بالا می‌تواند اثرات مخربی بر سیستم کارست منطقه داشته باشد؛ به ویژه در مناطقی که محل تغذیه‌ی چشمه‌های کارستی است؛ لذا جهت جلوگیری از تخریب و آلودگی آب‌های زیرزمینی با توجه به تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت این مناطق می‌توان مقررات و ضوابط خاص و دستورالعمل‌های لازم برای چگونگی بهره‌برداری در این پهنه‌ها ارایه گردد.

لایه ارتفاع در کنار آن این عامل به صورت قابل قبولی مورد سنجش قرار گرفته است، اما پیشنهاد می‌گردد عامل تبخیر مربوط به منطقه مورد مطالعه نیز به عنوان یک لایه مورد بررسی قرار گیرد تا بررسی عوامل مؤثر در منطقه و پهنه‌بندی حساسیت کارست بر مبنای آن‌ها از دقت و صحت بالاتری برخوردار گردد.

منابع

افراسیابیان، احمد (۱۳۷۲). مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی کرمانشاه.

افراسیابیان، احمد، (۱۳۸۴). نقش پدیده‌های کارستی در جلوگیری از خطرات و شناخت آسیب‌پذیری مناطق کارستی، کنفرانس خطرات فروچاله‌ها در مناطق کارستی.

بهمینیا، ابوالفضل؛ قنبرزاده، هادی؛ فرزانه، عباسعلی، (۱۳۸۸). ویژگی‌های ژئومورفیک توده کارستی اخلمد در دامنه‌های شمالی ارتفاعات بینالود، نشریه جغرافیا و توسعه، شماره ۱۴.

جعفری‌گل، منصور، مقیمی، ابراهیم، صفری فرشاد، (۱۳۹۰). استفاده از دم در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پراو - بیستون، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲۲.

خالقی، فاضل؛ موید، محسن، (۱۳۸۹). شناسایی منابع آب کارست با استفاده از روش‌های مورفوتکتونیک و ژئوالکتریک در جنوب غربی هادی شهر، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران.

خانلری، غلامرضا؛ مؤمنی، علی‌اکبر، (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعه فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین (غرب ایران)، نشریه جغرافیا و آمایش سرزمین، شماره ۳.

رامشت، محمدحسین؛ کمانه، عبدالعلی؛ فتوحی صمد، (۱۳۸۶). معرفت‌شناسی و مدل‌سازی در ژئومورفولوژی، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، سال ۳۹، شماره ۶۰، دانشگاه تهران.

رضایی مقدم، محمدحسین. قادری، محمدرضا، (۱۳۹۰). تحلیل‌های کمی دولین‌ها در زمین‌های کارستی مطالعه موردی منطقه تخت‌سلیمان.

طاهری، کمال؛ پرویزی، فریدون؛ معین، مهرداد؛ طاهری، میلاد، (۱۳۸۹). ارزیابی مخاطرات کارست در ایران با نگرشی بر ماهیت زمین‌شناسی و انسان‌زادی فروچاله‌های همدان، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران.

عابدینی، موسی، (۱۳۸۴). پژوهش در فرسایش کارستیک منطقه تکتونیزه شده دره دیز و دیوان داغی، نشریه فضای جغرافیایی.

عارفی، محمد رئوف. (۱۳۸۵). ژئومورفولوژی و منابع آب کارست ارتفاعات شاه و - شمال شهرستان‌های جوانرود و پاوه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

علائی طالقانی، محمود؛ رحیم زاده، زهرا، (۱۳۸۹). بررسی تحول کارست در منطقه زاگرس،

ملکی، امجد، (۱۳۸۸). شناسایی مناطق مساعد آلودگی آب‌های زیرزمینی به کمک پهنه‌بندی تحول کارست با GIS (مطالعه موردی استان کرمانشاه)، نظریه علوم زمین، سال هجدهم، شماره ۷۲.

- Batusta, f, Abote, G, Quintana, J, (2011), spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan Mexico, *Geomorphology*, NO 135.
- Bosak, P. (2003). *Karst Processes from the Begining to the end. Speleogenesis and Evolution of karst*, 3.
- Gillieson, David, (2001), *Caves, processes development management Black well*. Pu.UK.
- Goldschieder, N. (2005), *Karst Groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the swabian Alb, Germany, hydrology journal*, Vol. 13, No. 4.
- Mailer. B J, Personna, J, Loods, G, Drogue, C, (2000), *Transport of the free and particulate- associated bacteria in karst*, *Journal of hidrology*, No 345.
- Parice, M. Gunn, j. (2007) *natural and Athropogenical Hazard in karst Areas: recognition, Analysis and Mitigation* (Eds). Geological society, London, special publication, 297.
- Pingzoua, J, (2008), *Investigation of karst*, chin university of mini, *journal of hidrology*, No.349.
- Plan, L. Decker, K. Faber, R. (2003), *Attributed Sinks: A GIS-tool Quantifying Morphological Vulnerability Parameters in Karstic Catchment Areas*, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5.
- Raver, N. and Goldschieder N. (2009), *Comparative Application of Four Methods of Groundwater Vulnerability Mapping in a Slovene Karst Catchment*, *Hydrology Journal*, Vol. 17, No. 3.
- Rodriguz, V, Juang, D, (2011), *Morphometric analysis of three – dimensional networks of karst*, *Geomorphology*. NO. 132.

نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران.

غلامرضا خانلری، رضا حیدری ترکمانی، علی‌اکبر مؤمنی (۱۳۸۹). *مطالعات کارست و بررسی ویژگی‌های تزریق پذیری پی سنگ سد اکباتان (طرح افزایش ارتفاع)*، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، سال بیست و ششم، شماره پیاپی ۴۱ - شماره چهارم.

قبادی، محمدحسین، (۱۳۸۶). *زمین‌شناسی مهندسی کارست*، انتشارات بوعلی سینا، همدان.

مقدم شبیلو، حجت؛ یوسفی، مرتضی؛ محبی، حمیدرضا، (۱۳۹۰). *بررسی وضعیت تخلخل و فرآیند کارستی شدن در نهشته‌های یال جنوبی تاقدیس خورموج بوشهر، پانزدهمین انجمن زمین‌شناسی ایران.*

مقصودی، مهران؛ کریمی، حاجی کریمی؛ صفری، فرشاد؛ چهارراهی، ذبیح‌ا...، (۱۳۸۸). *بررسی توسعه کارست در توده پرآو-بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۹.*

ملکی، امجد و محمودی، فرج‌الله (۱۳۸۰). *تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون - پرآو (کرمانشاه)*، نشریه پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۰.

ملکی، امجد، (۱۳۸۶). *نقش زمین ریخت شناسی کارست در بررسی هیدروژئولوژی ناهمواری‌های بیستون-پرآو، کنفرانس بررسی منابع آب استان کرمانشاه.*

White, w, Vepser, D, (2003), Metal transport to Karst springs during storm flowe, Gournal of Hidrologj, No 276.

Tang, T, (2003), Surface sediment charactoristcs and planning stat, university OT Newyork, Geomorphology, No. 31.