

پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در زاگرس جنوبی (مطالعه موردی: حوضه سیف‌آباد لاغر)

مهران مقصودی* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران
هانیه اخوان - دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران
مجتبی مهدیان ماهفروزی - دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران
غدیر عشورنژاد - دانشجوی دکتری، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۵/۰۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۲/۰۷

چکیده

یکی از روش‌های بررسی‌های ژئومورفولوژی، تعیین میزان کارستی شدن و شدت فرسایش سنگ‌های کربناته است. در این پژوهش، با استفاده از نه متغیر سعی بر پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در حوضه سیف‌آباد لاغر بوده است. داده‌های مورد نیاز از منابع مختلف نظیر سازمان هواشناسی، آب منطقه‌ای استان فارس، نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، و مدل ارتفاعی رقومی استخراج و لایه‌های لازم تهیه شد. همچنین، با استفاده از تابع گاما فازی با ضرایب مختلف تحت نرم‌افزار ArcGIS، نقشه‌های پهنه‌بندی شدت انحلال تهیه شد. برای ارزیابی، ضریب همبستگی خروجی‌ها با میزان یون کلسیم محلول در آب‌های زیرزمینی منطقه محاسبه شد که نشان‌دهنده ارتباط قوی ضریب گاما ۰/۴ با درون‌یابی یون کلسیم و تناسب این ضریب برای پهنه‌بندی شدت انحلال کارست است. به علاوه، حوضه دارای نرخ فرسایشی کم است و بیشینه شدت فرسایش انحلالی کارست در جنوب غربی منطقه و کمینه آن در شمال حوضه رخ می‌دهد. همچنین، بیشینه فرسایش انحلالی در سازندهای غیرکربناته بر نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای و در سازندهای کربناته بر گروه بنگستان انطباق دارد. کمترین میزان فرسایش در سازندهای کربناته در کنگلومرای بختیاری و در سازندهای کربناته در آهک آسماری و جهرم اندازه‌گیری شده است.

کلیدواژه‌ها: انحلال کارست، حوضه سیف‌آباد لاغر، سنگ‌های آهکی، گامای فازی.

مقدمه

سرزمین ایران به دلیل وجود نهشته‌های کربناته در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی از پهنه‌های کارستی شایان توجهی برخوردار است، به طوری که در ایران علاوه بر غارها، توسعه‌یافته‌ترین اشکال کارستی یعنی پولیه‌ها و اشکال مینیاتوری کارستی در حوضه‌ها (مانند لایپه‌ها) نیز مشهود است (طاهری، ۱۳۸۴: ۳۲). سرزمین‌های کارستی از دیدگاه‌های مختلفی بررسی شده‌اند. اهمیت اصلی این پهنه‌ها در حجم قابل توجه آب‌های زیرزمینی موجود در سازندهای کارستی است. این مخازن آب هم از نظر کمی و هم از بعد کیفی عموماً مطلوب‌اند و به مصرف شرب می‌رسند. دیگر اهمیت این پهنه‌ها در

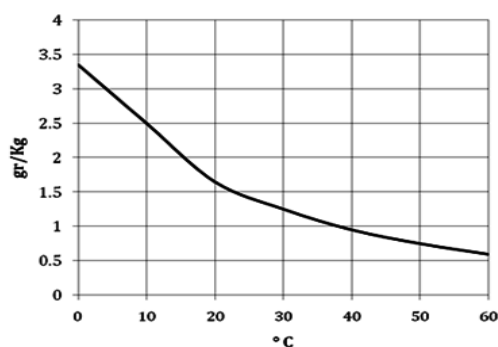
اشکال متنوعی است که در مناطق کارستیک تشکیل می‌شوند و توسعه می‌یابند. این موضوع برای سرزمینی مانند ایران که از یک سو به دلیل شرایط اقلیمی از منابع آب کافی برخوردار نیست و از سوی دیگر حدود ۱۱ درصد مساحت آن را سنگ‌های کربناته (افراسیابیان، ۱۳۷۳: ۱۸) می‌پوشاند اهمیت دارد، چرا که بسیاری از شهرها و روستاهای کشور به شدت به منابع آب کارست وابسته‌اند (طاهری، ۱۳۸۴: ۳۳). همین امر موجب شده است تا به شناسایی و بهره‌برداری از ذخایر سازندهای کارستی در کشور به طور فزاینده‌ای توجه شود.

علاوه بر مطالعاتی که با اهداف شناسایی کارست در بسیاری از نقاط ایران صورت گرفته است، تشریح و تبیین اشکال زمین و به عبارتی دیگر بررسی‌های ژئومورفولوژی نیز در مطالعات مربوط به اکتشاف آب‌های زیرزمینی نقش ویژه‌ای دارد. این امر در قلمرو سنگ‌های کارستی شاخص‌تر است زیرا میزان تحول اشکال توپوگرافی ارتباط مستقیمی با میزان انحلال آن‌ها دارد. به همین دلیل محققان اصولاً به تابع آب زیرزمینی در ارتباط با میزان توسعه فضاهای خالی در سنگ‌های کربناته توجه دارند که ارتباط نزدیکی با ژئومورفولوژی کارست دارد (فرهودی، ۱۳۷۳: ۲۸۱). در ایران ژئومورفولوژی اشکال کارستی را محققان مختلفی بررسی کرده‌اند، از جمله، توزیع فضایی سنگ‌های کارستی در ایران (علایی طالقانی، ۱۳۸۳: ۲۸)، تحول کارست در منطقه زاگرس (علایی طالقانی و رحیم‌زاده، ۱۳۸۹: ۳۳۱)، پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه (ملکی و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۷۲)، اهمیت شناخت خصوصیات ژئومورفولوژیکی، سنگ‌شناسی و فیزیکی سنگ‌های کربناته (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۰۰)، رابطه ساختارهای تکتونیک و اشکال کارستی در حوضه آبریز کارده (ولایتی و خانعلی‌زاده، ۱۳۹۰: ۱۷۲)، توسعه کارست در توده پراو بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۲)، استفاده از مدل ارتفاعی رقومی در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پراو بیستون (جعفری‌گلو و همکاران، ۱۳۹۰: ۲)، شناسایی مناطق مساعد آلودگی آب‌های زیرزمینی به کمک پهنه‌بندی کارست در استان کرمانشاه (ملکی، ۱۳۸۸: ۲۶) و نحوه تشکیل غار کتله‌خور در استان زنجان (رضایی و نخعی، ۱۳۸۷: ۱۲).

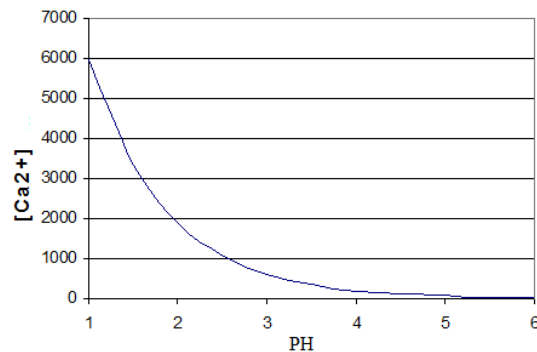
در مورد محققان خارجی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بررسی میزان و شدت فرسایش کارستی (گان، ۲۰۱۳: ۷۳)، مدلسازی آثار تغییرات آلاینده‌های جوی بر میزان فرسایش سنگ آهک در لندن (اینکین و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۷۷)، اندازه‌گیری میزان فرسایش کارستی با استفاده از کلر-۳۶ در ساختارهای کلسیتی در استرالیا (استون و همکاران، ۱۹۹۴: ۳۱۲)، تکامل کارست‌های لایه‌ای در سازندهای گچی (کلیمشوک، ۲۰۱۳: ۴۳۹)، طبقه‌بندی فروچاله‌های بسته در کارست‌های کربناته (کرانیک، ۲۰۱۳: ۱۰۵)، تعیین منابع آلودگی نیترا در چشمه‌های کارستی با استفاده از ایزوتوپ‌های شیمیایی (پانو و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۱۴)، اندازه‌گیری میزان فرسایش در قله‌های کارستی ژاپن (ماتسوشی و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۲۰۶)، مدلسازی آثار تغییر اقلیم بر ژئومورفولوژی اشکال کارستی انگلستان و ایرلند (هیتیر، ۲۰۰۳: ۶۰)، مقایسه میزان فرسایش کارست‌های ساحلی و درون‌خشکی در ناحیه آدریاتیک شمال شرقی (فورلانی و همکاران، ۲۰۰۹: ۷۴)، و عوامل کنترل‌کننده میزان فرسایش کارستی در آلپ اتریش (پلان، ۲۰۰۵: ۲۰۲).

به‌طور کلی، عوامل مؤثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست را می‌توان به سه دسته فیزیکی، شیمیایی، و وضعیت هیدروژئولوژیکی تقسیم کرد. در مجموع هفت عنصر برای ایجاد و توسعه کارست لازم است: نزولات جوی، درجه پستی و

بلندی، وضعیت مناسب سنگ‌شناختی، ضخامت لایه‌های کربناته، میزان و فشار دی‌اکسید کربن (البته ترکیبات معدنی دیگر مانند دی‌اکسید گوگرد و سولفید هیدروژن و اکسیدهای نیتروژن نیز ممکن است به طور موضعی دخالت داشته باشند)، دما، و موقعیت تکتونیکی مساعد. هر چند اگر محدوده مطالعه کوچک‌تر باشد، عوامل دیگر مانند دخالت‌های انسانی و میزان ماده آلی تولیدشده، حتی نزدیکی به آتشفشان‌های فعال یا مناطق با شیب زمین‌گرایی بالا را می‌توان دخالت داد (وایت، ۱۹۸۸: ۲۸). در واقع، اشکال کارست با انحلال و رسوبگذاری کربنات کلسیم تشکیل می‌شود و توسعه می‌یابد. از آنجا که سنگ‌های کربناته ذاتاً نفوذناپذیرند، آب در صورتی در این سنگ‌ها نفوذ می‌کند که درز و شکاف داشته باشد. آب در داخل درز و شکاف سنگ‌های قابل انحلال مثل کربنات کلسیم نفوذ می‌کند و موجب توسعه آن می‌شود و سازندهای انحلالی کارستی را پدید می‌آورد. از دیگر سو، با رسوبگذاری کربنات کلسیم حل‌شده در آب در مناطق دیگر سازندهای نهشته‌ای کارستی پدید می‌آید (مول و همکاران، ۱۹۸۸: ۴۱). در واقع، میزان فرسایش کارست در نواحی مختلف ناشی از تغییر این عوامل است و هر چه تأثیر این عوامل در ناحیه‌ای فزون‌تر باشد، کارست توسعه بیشتری می‌یابد. فرایند انحلال و ژئوشیمی کارست به ترتیب زیر است: در مرحله نخست با حل شدن دی‌اکسید کربن در آب (باران) اسید کربنیک تشکیل می‌شود (رابطه ۱). از آنجا که میزان انحلال گاز کربنیک در آب با دمای آب رابطه معکوس دارد (شکل الف)، هر چه دمای آب پایین‌تر رود (با فرض ثابت بودن فشار گاز کربنیک) میزان بیشتری از دی‌اکسید کربن در آب حل و اسید قوی‌تری تشکیل می‌شود. در نتیجه، میزان یون هیدروژن تولیدشده با اسید (pH) بیشتر است و قابلیت انحلال کربنات کلسیم نیز بیشتر می‌شود (شکل ب).



ب)



الف)

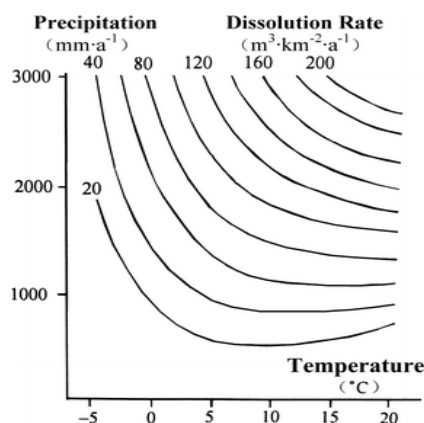
شکل ۱. الف) رابطه دمای آب با میزان انحلال دی‌اکسید کربن (محور افقی دمای آب بر حسب درجه سانتی‌گراد و محور عمودی میزان انحلال دی‌اکسید کربن به گرم در هر کیلوگرم آب)، ب) رابطه pH دی‌اکسید کربن حل‌شده در آب با میزان انحلال کلسیم (محور افقی pH اسید کربنیک و محور عمودی میزان انحلال یون کلسیم در آب بر حسب مول) (وایت، ۱۹۸۸)

اسید کربنیک پس از تشکیل دو نوع یون ایجاد می‌کند که طبق رابطه ۲ ایجاد می‌شوند. در مرحله نهایی، با اختلاط اسید کربنیک با سنگ‌های کربناته، این سنگ‌ها طی رابطه ۳ در آب حل می‌شوند. پس از انحلال، این سنگ‌ها به همراه آب حمل می‌شوند. در هر جایی و به هر دلیلی که میزان دی‌اکسید کربن آب کاهش یابد، ظرفیت نگهداری کلسیم اسید

نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه بخشی از کلسیم به شکل کربنات کلسیم رسوب می‌کند. با توجه به رابطه دوطرفه فرمول‌های بالا، همواره احتمال رخداد چنین شرایطی وجود دارد (وایت، ۱۹۸۸: ۳۲؛ سلیبی، ۱۹۸۵: ۹۶).



هرچند در شرایط آزمایشگاهی انحلال سنگ‌های آهکی از روابط بالا تبعیت می‌کند، در طبیعت شرایط بسیار پیچیده‌تری بر فرایندهای کارستی حکمفرماست. ژيونگ و همکاران (۲۰۰۹: ۱۴۸۲) معادلات مربوط به انحلال کارست در طبیعت را که از سوی کائو (۲۰۰۵: ۱۰۱) معرفی شده بود در قالب نموداری به نمایش گذاشتند (شکل ۲). بر اساس پژوهش‌های این محققان، زمانی که دمای هوا کم است، تغییرات بارش تأثیر اندکی بر میزان انحلال کارست دارد، اما زمانی که دمای هوا به ۱۶ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد با افزایش بارش میزان انحلال کارست به سرعت افزایش می‌یابد.

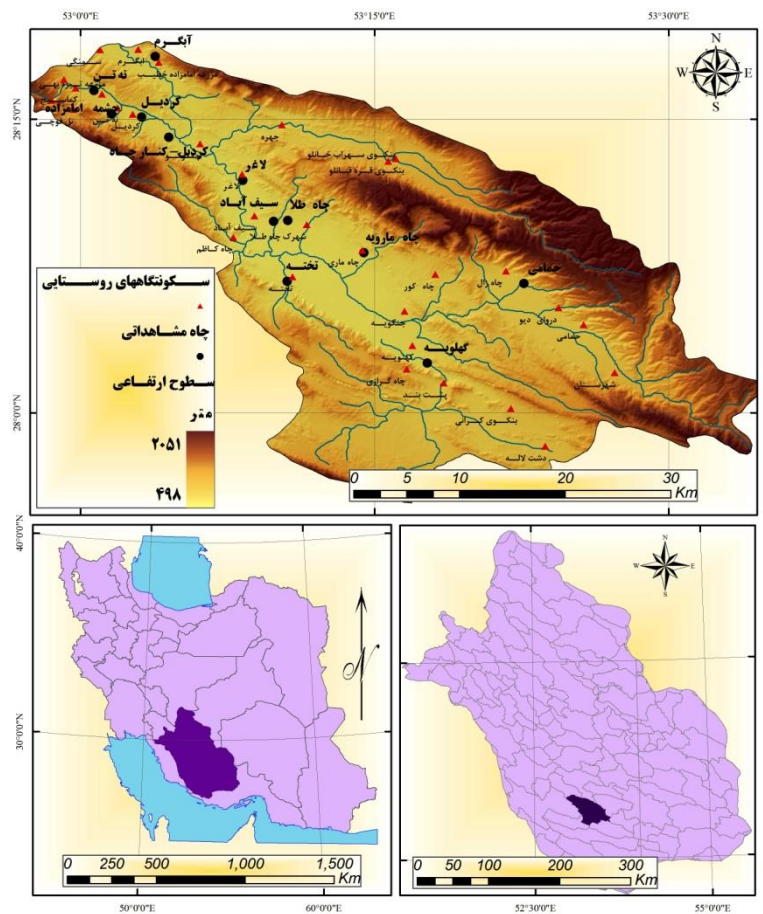


شکل ۲. رابطه بین دما، بارش و میزان انحلال کارست در طبیعت. محور افقی میانگین سالانه دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد، خطوط منحنی میانگین مجموع بارش سالانه بر حسب میلی‌متر، و محور عمودی میزان انحلال سنگ‌های کربناته بر حسب مترمکعب در کیلومتر مربع در هر سال را نشان می‌دهد (ژيونگ و همکاران، ۲۰۰۹).

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، حوضه سیف‌آباد لاغر در استان فارس است که به لحاظ تقسیمات حوضه‌های کشوری وزارت نیرو یکی از زیرحوضه‌های حوضه بزرگ مند قرار می‌گیرد و با کد ۲۶۲۱ شناسایی می‌شود. از لحاظ موقعیت ریاضی، این حوضه بین طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۷ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۶ دقیقه شمالی قرار گرفته است. از لحاظ موقعیت نسبی، این حوضه در جنوب استان فارس در محدوده شهرستان کازرون قرار دارد. مساحت حوضه برابر ۱۲۴۴/۸۲ کیلومتر مربع و محیط آن برابر ۱۹۲/۲ کیلومتر است.

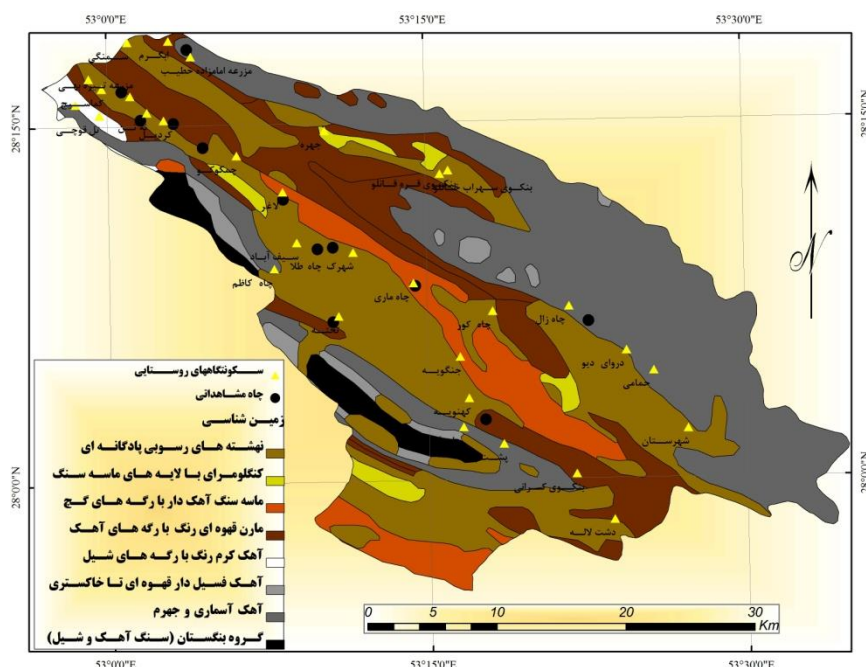
بخش اعظم حوضه به صورت دشتی وسیع دیده می‌شود که در حاشیه‌های شمال شرقی و شرقی به ارتفاعات ختم می‌شود. دامنه ارتفاعات حوضه بین ۴۹۸ تا ۲۰۵۱ متر تغییر می‌کند (شکل ۳). بر اساس گزارش آب منطقه‌ای استان فارس، متوسط بارش در این حوضه ۲۹۸/۵ میلی‌متر است که از ۲۷۲/۵ تا ۳۱۷/۳ میلی‌متر در نقاط مختلف حوضه تغییر می‌کند. متوسط دمای سالانه حوضه نیز ۲۲/۷ درجه سلسیوس است که در نقاط مختلف حوضه بین ۲۱/۹ تا ۲۴/۱ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. تعداد دوازده حلقه چاه سنجش و اندازه‌گیری خصوصیات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی در منطقه وجود دارد (شکل ۳).



شکل ۳. موقعیت و سیمای طبیعی منطقه، و پراکنش فضایی چاه‌های مشاهده‌شده

سنگ‌های منطقه در طبقه‌بندی کلی در پنج دسته سنگ‌های آهکی (شامل سازند ضخیم و فسیل‌دار کژدمی، سازندهای آهک آسماری و جهرم، و گروه تفکیک‌نشده بنگستان متشکل از آهک‌های کژدمی، سروک، ایلام و سورگاه)، نهشته‌های آبرفتی دره‌ای و مخروط‌های پدیمتی، کنگلومرا (سازند بختیاری)، مارن (مارن‌های آهک‌دار قهوه‌ای رنگ سازند میشان)، و ماسه‌سنگ (ماسه‌سنگ قهوه‌ای آهک‌دار به همراه گچ و مارن: سازند آقاجاری) جای می‌گیرد (شکل ۴). بیشترین پراکنش سازندهای آهکی منطقه در بخش شمالی منطقه است که به صورت نوار شمال غربی- جنوب شرقی

دیده می‌شود. در جنوب منطقه نیز سنگ‌های آهکی با تنوع بیشتری به چشم می‌خورد که به لحاظ روند، مشابه سازندهای شمالی‌اند. در بخش‌های شمالی و شرقی، در حد فاصل سنگ‌های آهکی، مارن‌های آهک‌دار دیده می‌شود که از سمت دیگر با رسوبات و نهشته‌های پادگانه‌ای و دره‌ای در تماس‌اند. رگه‌ای از ماسه‌سنگ آهک‌دار نیز در منطقه دیده می‌شود. همچنین، پهنه‌های کوچکی از کنگلومرای بختیاری نیز به صورت پراکنده در منطقه مشهود است. با توجه به مباحث بالا، در این پژوهش نگارندگان با استفاده از معیارهای محیطی و با به کارگیری ضرایب مختلف گاما فازی سعی بر انتخاب بهترین مدل و مناسب‌ترین ضریب برای پهنه‌بندی میزان انحلال کارست در حوضه سیف‌آباد لاغر (واقع در زاگرس جنوبی) و پهنه‌بندی حوضه نامبرده با استفاده از مناسب‌ترین ضریب دارند.



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی منطقه

مواد و روش‌ها

الف) شناسایی عوامل مؤثر در انحلال کارست

با توجه به رابطه ۱ تا ۳ و شکل‌های ۱ و ۲، میزان بارش در یک منطقه و دمای آن منطقه نقش بسیار مؤثری در کارستی شدن آن منطقه دارد. به علاوه، هر عاملی که میزان تماس آب را با سطوح کارستی افزایش دهد نیز بر میزان انحلال سازندهای کارستی مؤثر است. از این‌رو، با توجه به مطالعات پیشین شاخص‌های ذیل جهت پهنه‌بندی میزان انحلال کارست در منطقه مورد بررسی استخراج شد: ۱. بارش، ۲. دما، ۳. تراکم فروچاله‌ها، ۴. فاصله از فروچاله‌ها، ۵. تراکم شبکه زهکشی، ۶. فاصله از آبراهه‌ها، ۷. تراکم گسل، ۸. فاصله از گسل، ۹. شیب.

فروچاله‌ها شکل‌های ژئومورفیکی دایره‌ای یا بیضی شکلی دارند که مشخص‌ترین و گویاترین شکل‌های سطحی کارستی به شمار می‌روند (محمودی، ۱۳۸۶: ۸۹). ابعاد این شکل‌ها از چند متر تا چند صد متر متغیر است و شکل اصلی

آن‌ها حفره‌های دایره‌ای است که عمدتاً بر اثر دخالت آب‌های جاری شکل مخروطی به خود می‌گیرند و عمقی در حد ده‌ها متر دارند. در سرزمین‌های آهکی که فعالیت‌های کارستی شدید است، پراکندگی و نظم این حفره‌ها با درزه‌های اصلی یا حاشیه دره‌های گود یا شبکه دره‌های کور در ارتباط است (همان: ۹۰). به دلایل فوق، تراکم فروچاله‌ها از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی برای سنجش میزان کارستی شدن منطقه است. بر همین اساس، با کاهش فاصله از این عوارض، احتمال کارستی شدن نیز افزایش می‌یابد. تراکم شبکه زهکشی و فاصله از آبراهه از آن رو اهمیت دارد که تراکم بیشتر شبکه زهکشی آب بیشتری برای انجام فرایند انحلال کارستی فراهم می‌سازد و فاصله از آبراهه نیز همین نقش را در جهت معکوس ایفا می‌کند. همچنین، با افزایش گسل در مناطق کارستی، درز و شکاف بیشتری در این سازندها پدید می‌آید که این درز و شکاف‌ها به نوبه خود سبب تماس بیشتر آب با سنگ‌های کربناته می‌شود و احتمال کارستی شدن را بیشتر می‌کند. به اثبات رسیده است که بهترین کارست‌ها در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها تشکیل می‌شود. عامل شیب نیز از آن جهت اهمیت دارد که شیب بیشتر سبب افزایش سرعت جریان آب می‌شود و احتمال کارستی شدن را کاهش می‌دهد. بنابراین، انتظار می‌رود بیشترین میزان انحلال کارست در مناطقی باشد که دما، بارش، تراکم فروچاله‌ها، تراکم شبکه زهکشی، و تراکم گسل بیشتر و فاصله از فروچاله‌ها، فاصله از آبراهه‌ها، فاصله از گسل‌ها، و شیب کمتری داشته باشد.

ب) گردآوری داده‌ها

به منظور پهنه‌بندی شدت فرسایش کارستی در حوضه سیف‌آباد لاغر پس از مطالعات کتابخانه‌ای و مرور منابع مختلف، و انتخاب معیارهای مورد نظر، داده‌های مورد نیاز برای شاخص‌های مختلف از منابع متعددی استخراج شد. داده‌های مربوط به دما و بارش از آمار ایستگاه‌های همیدی و ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو و شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران برای حوضه سیف‌آباد استخراج شد. پس از آزمون داده‌ها و انجام تست همگنی و اطمینان از صحت داده‌ها، نقشه بارش و دمای منطقه با توجه به مطالعات پیشین (ثقفیان و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۰) با استفاده از روش کریجینگ ساده^۱ درون‌یابی شد (به دلیل دقت بیشتر این روش در درون‌یابی بارش و دمای منطقه در مقایسه با سایر روش‌های درون‌یابی). پس از آن، درون‌یابی‌های مذکور با نقشه‌های شرکت آب منطقه‌ای استان فارس و گزارش تلفیق مطالعات منابع آب حوضه سیف‌آباد لاغر مقایسه شد. با حصول اطمینان از دقت آن‌ها، لایه‌های رقومی آن‌ها ایجاد شد. برای استخراج فروچاله‌ها از مدل ارتفاعی رقومی با دقت ۳۰ متر برای منطقه مذکور استفاده شد. استخراج فروچاله‌ها با استفاده از روش جعفریگلو و همکاران (۱۳۹۰: ۱۴) صورت گرفت. برای استخراج شبکه زهکشی منطقه نیز از گزینه الحاقی ArcHydro استفاده شد. گسل‌های منطقه نیز با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ قیر، خنج، و جهرم و رقومی‌سازی آن‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استخراج شد. پس از آن، تمامی لایه‌های مربوط به تراکم و فاصله از فروچاله‌ها، شبکه زهکشی، و گسل‌ها با استفاده از توابع تحلیل فضایی نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

استخراج شیب نیز با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و با به‌کارگیری توابع استخراج شیب صورت گرفت. داده‌های مربوط به کیفیت آب زیرزمینی منطقه نیز از شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران برای چاه‌های مشاهداتی منطقه دریافت شد.

ج) تلفیق عوامل و پهنه‌بندی شدت فرسایش سنگ‌های کربناته

یکی از مهم‌ترین توانایی‌های GIS که آن را سیستمی ویژه و انحصاری مجزا می‌کند، توانایی تلفیق داده‌ها برای مدل‌سازی، مکان‌یابی و تعیین تناسب اراضی از طریق ارزش‌گذاری پهنه‌سرزمین است، زیرا در نتیجه تلفیق و ترکیب معیارها، بهترین نقطه برای استقرار مراکز و مکان‌های بهینه انتخاب می‌شود (پوراحمد و همکاران، ۱۳۸۶: ۳۴). منطق بولین^۱، منطق همپوشانی شاخص^۲، منطق احتمالات^۳، ضریب همبستگی^۴، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۵، ژنتیک^۶، آنالیز خوشه‌بندی خاکستری^۷ و منطق فازی^۸ از جمله روش‌های ترکیب معیارها هستند.

در این بین منطق فازی تعمیمی از نظریه کلاسیک مجموعه‌ها در علم ریاضیات و روشی نوین جهت بیان عدم قطعیت‌ها و ابهام‌های روزمره است (حسینی و دیگران، ۱۳۹۰: ۷۲). بر اساس نظریه فازی مجموعه‌ها، یک مجموعه فازی زیرمجموعه‌ای است که مقدار عضویت عناصر آن در مجموعه اصلی با توجه به تابع عضویت حد واسط بین صفر و یک باشد. مقدار درجه عضویت هر کلاس و واحد مکانی بر اساس نظرهای کارشناسی و استفاده از دانش داده‌ای تعیین می‌شود. سپس، با استفاده از عملگرهای فازی، عملیات تلفیقی مورد نظر انجام می‌شود. پنج عملگر فازی به نام اشتراک فازی، اجتماع فازی، ضرب فازی، جمع فازی و فازی گاما برای تلفیق مجموعه فاکتورها استفاده می‌شود. در نهایت، با اعمال عملگرهای فازی، واحدهای مکانی نقشه خروجی حاوی درجه عضویت خواهند بود (شاد و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۴۹). یکی از عملگرهای مهم منطق فازی، عملگر ضرب جبری فازی^۹ است که با استفاده از آن ترکیب لایه‌ها صورت می‌گیرد. در این اپراتور تمامی لایه‌های اطلاعاتی در هم ضرب می‌شود و در لایه خروجی اعداد به سمت صفر میل می‌کند که این روند ناشی از ضرب چندین عدد کمتر از یک است. در عملگر جمع جبری فازی^{۱۰} نتیجه همیشه بزرگ‌تر یا مساوی بزرگ‌ترین مقدار عضویت فازی در لایه است. به همین دلیل در نقشه خروجی برخلاف عملگر ضرب جبری فازی ارزش پیکسل به سمت یک میل می‌کند (حسینی و دیگران، ۱۳۹۰: ۷۲). فرمول مربوط به عملگر ضرب و جمع فازی به ترتیب به صورت روابط ۴ و ۵ تعریف می‌شود.

1. Boolean logic (algebra)
2. Overlay index
3. Probability algebra
4. Correlation coefficient
5. Artificial neural network
6. Genetic algorithm
7. Grey clustering analysis
8. Fuzzy logic
9. Fuzzy product
10. Fuzzy sum

$$\mu_{Combination} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن $\mu_{Combination}$ لایه حاصل از حداقل سازی، μ_i لایه فازی، و $i = 1, 2, 3, \dots, n$ تعداد نقشه‌های ترکیب‌شونده را نشان می‌دهد.

$$\mu_{Combination} = 1 - \left(\prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن $\mu_{Combination}$ لایه حاصل از حداکثر سازی، μ_i لایه فازی، و $i = 1, 2, 3, \dots, n$ تعداد نقشه‌های ترکیب‌شونده را نشان می‌دهد. در این عملگر ابتدا عدد ۱ را از هر یک از لایه‌های فازی کم می‌کنیم. سپس، تمامی لایه‌ها در هم ضرب می‌شوند. بعد از این مراحل مجدداً عدد ۱ را از لایه نهایی کم می‌کنیم تا لایه جمع جبری فازی ایجاد شود (حسینی و دیگران، ۱۳۹۰: ۷۲). برای تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی، عملگر دیگری به نام گامای فازی^۱ معرفی شده است که حد فاصل ضرب و جمع جبری فازی است. این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس رابطه ۶ تعریف می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۳۹۰: ۷۳؛ شاد و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۵۳).

$$\mu_{Combination} = (Sum)^\gamma * (Product)^{1-\gamma} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن $\mu_{Combination}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده صفر و یک است. وقتی γ برابر ۱ باشد ترکیبی که اعمال می‌شود همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد ترکیب برابر ضرب جبری فازی است. انتخاب صحیح γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهش‌ی ضرب جبری فازی سازگاری دارد (حسینی و دیگران، ۱۳۹۰: ۷۳).

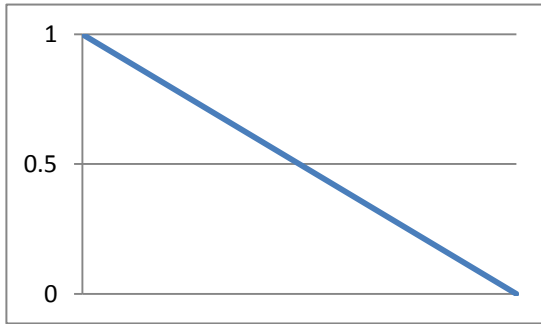
با توجه به مطالب بیان‌شده جهت پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در حوضه مورد نظر، از ضرایب گوناگون گاما استفاده شد. در ابتدا میزان عضویت فازی هر کدام از عوامل با توجه به مطالعات پیشین و منابع موجود تعیین شد (شکل ۵). برای این منظور از ابتدا روند تغییرات هر کدام از عوامل مورد نظر بررسی، سپس ارزش این تغییرات محاسبه شد. بر اساس مطالعات پیشین، با افزایش اندازه متغیرهای بارش، دما، تراکم گسل، تراکم آبراهه، و تراکم فروچاله‌ها ارزش نیز افزایش می‌یابد و از روند صعودی پیروی می‌کند (شکل الف ۵). از تابع عضویت فازی زیر (رابطه ۷) برای تهیه نقشه فازی این عوامل استفاده شد (شکل ۶).

$$f(x) = (x - x_{min}) / \Delta x \quad x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad \text{رابطه (۷)}$$

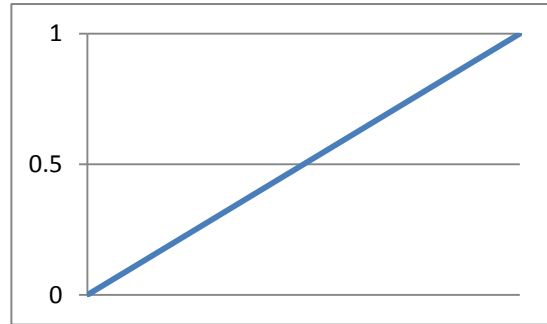
همچنین، متغیرهای فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از فروچاله‌ها، و شیب از روند صعودی تبعیت می‌کنند. با افزایش مقادیر این دسته، از ارزش نیز کاسته می‌شود (شکل ب ۵). از تابع عضویت فازی (رابطه ۸) برای تهیه نقشه فازی این عوامل استفاده می‌شود (شکل ۶).

رابطه ۸) $f(x) = (x_{max} - x) / \Delta x \quad x_{min} \leq x \leq x_{max}$

در ادامه، جهت تلفیق عوامل از ضرایب گوناگون گاما با فاصله ۰/۱ از هم استفاده شد.

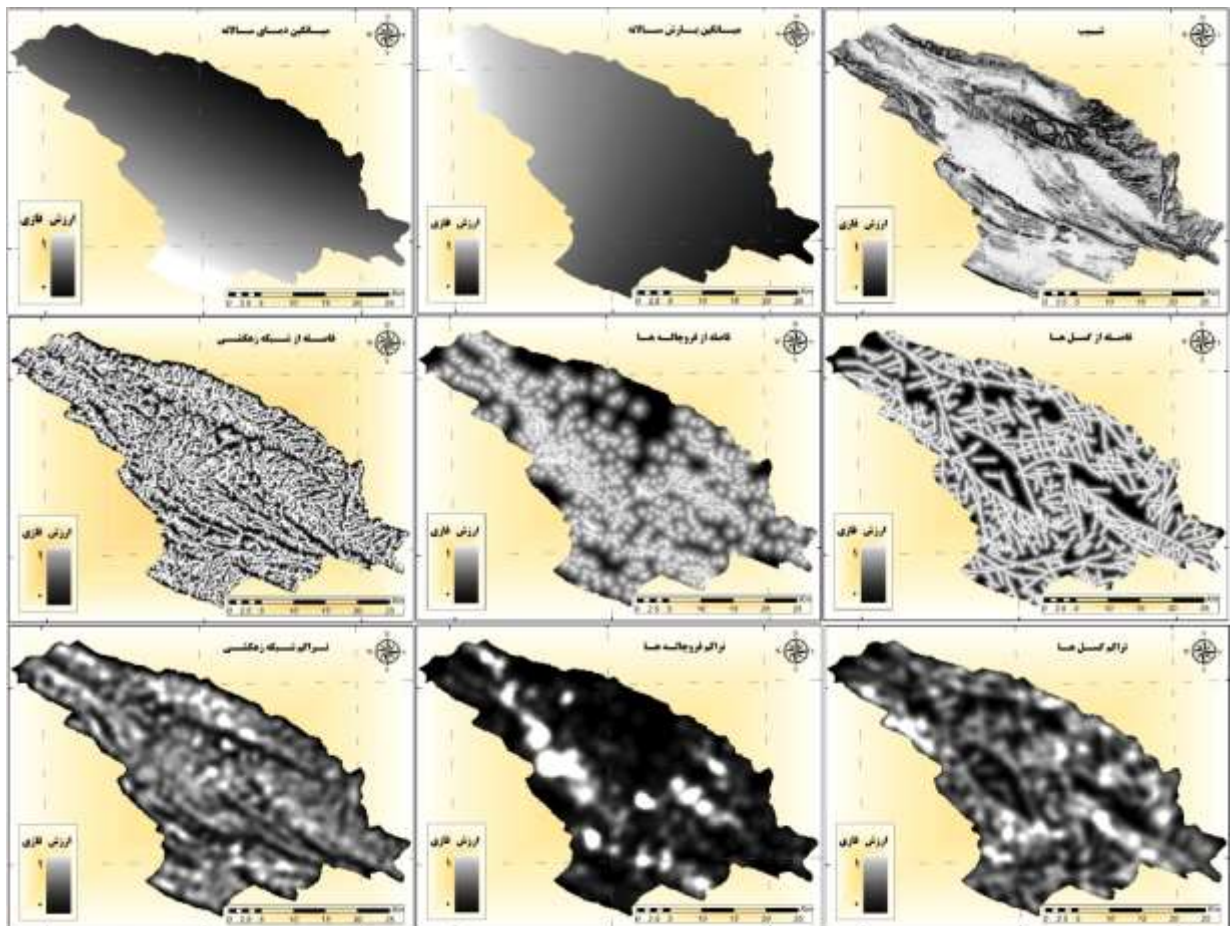


(ب)



(الف)

شکل ۵. نمودار تابع عضویت فازی متغیرهای مورد استفاده در پژوهش. الف) روند صعودی، ب) روند نزولی ارزش فازی. محور عمودی درجه تابعیت فازی را در متغیرها نمایش می‌دهد.



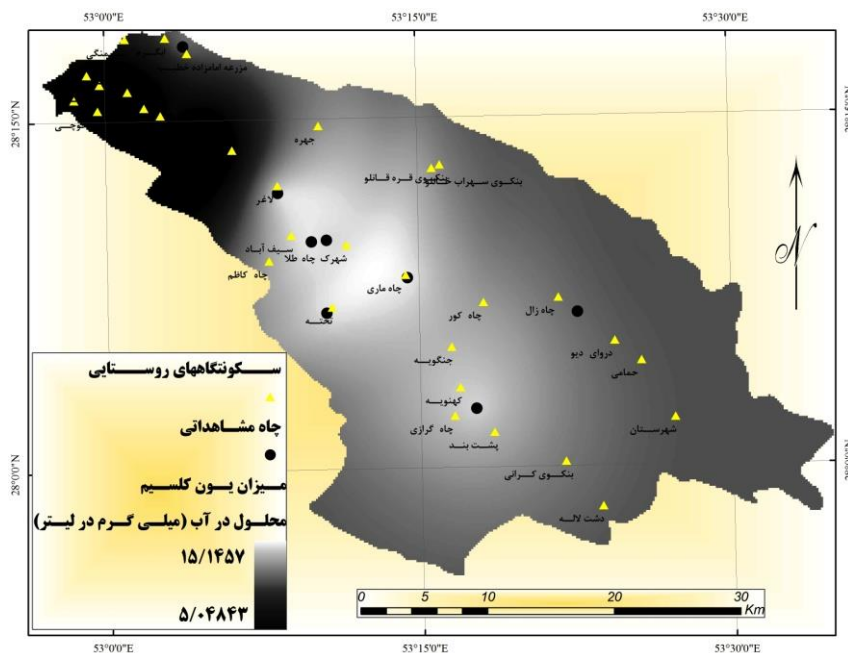
شکل ۶. نقشه فازی هر کدام از نه عامل مؤثر بر شدت انحلال سنگ‌های کربناته در حوضه مورد نظر

د) ارزیابی و اعتبارسنجی مدل و انتخاب بهترین ضریب گاما

به منظور سنجش اعتبار مدل و تعیین مناسب‌ترین ضریب گاما برای پهنه‌بندی شدت فرسایش آهکی در منطقه، بنا بر مطالعات انجام‌گرفته قبلی (شعبانی، ۱۳۹۰: ۹۴؛ رضازاده و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۴؛ لاله‌زاری و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۴؛ پانو و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۱۴) ابتدا با استفاده از روش کوکریجینگ با استفاده از تابع نمایی داده‌های یون‌های کربنات کلسیم، کلسیم، منیزیم و سولفات درون‌یابی و برای کل منطقه میزان یون‌های مورد نظر محاسبه شد (شکل ۷). پس از آن، با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، بین تک‌تک لایه‌های منتج از اعمال ضرایب مختلف گاما با لایه درون‌یابی‌شده مذکور با استفاده از توانایی فرمول‌نویسی در محیط رستری سامانه اطلاعات جغرافیایی همبستگی برقرار شد. از ۸۲۹۳۳ پیکسل کل، میان هر پیکسل با پیکسل متناظر آن رابطه همبستگی دارد. به عبارت دیگر، لایه‌های منتج از اعمال ضرایب گاما متغیر اول (x) و لایه‌های منتج از درون‌یابی یون‌های نامبرده متغیر دوم (y) فرض شدند ($d_f = 82933$). در نهایت، نیز ضرایب همبستگی محاسبه و در جدول ۱ به نمایش گذاشته شد.

جدول ۱. ضرایب همبستگی بین مقادیر خروجی از ضرایب مختلف گاما با میزان یون کلسیم در منطقه

گاما ۰	گاما ۰/۱	گاما ۰/۲	گاما ۰/۳	گاما ۰/۴	گاما ۰/۵	گاما ۰/۶	گاما ۰/۷	گاما ۰/۸	گاما ۰/۹	گاما ۱	
ضریب همبستگی	۰/۱۰۴۴۵	۰/۱۰۴۵۶	۰/۱۰۸۰۶۸	۰/۰۵۸۷۳	۰/۵۵۵۹	۰/۰۹۱۵۸	۰/۰۵۶۷۶	۰/۱۴۶۸۶	۰/۱۵۳۵۳	۰/۱۹۹۰۶	۰/۱۹۹۷۱



شکل ۷. میزان متوسط یون‌های کلسیم محلول در آب در حوضه سیف‌آباد لاغر

یافته‌های پژوهش

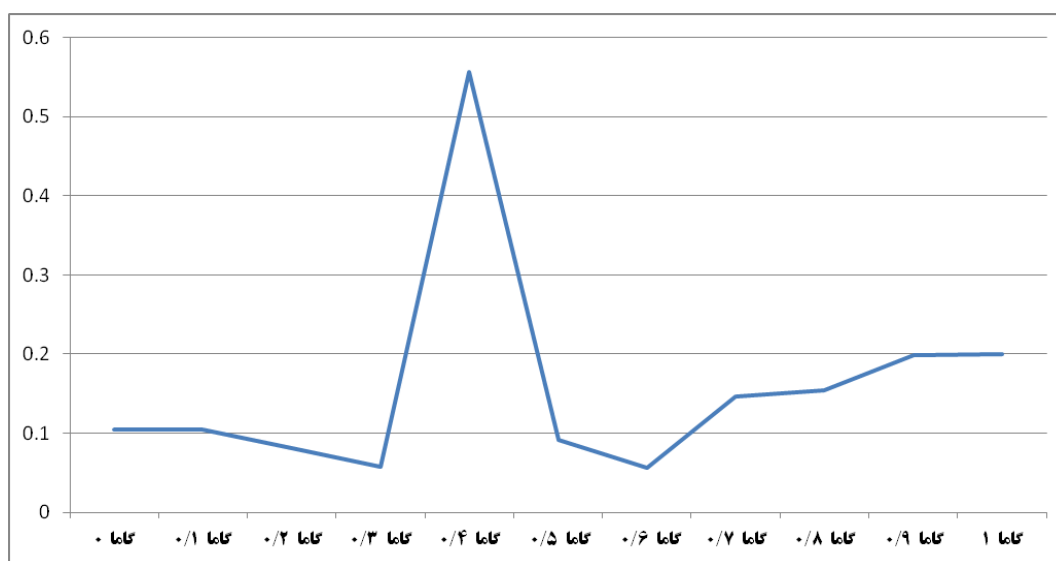
پس از اعمال توابع عضویت فازی (روابط ۷ و ۸) بر اساس شکل ۵، نقشه فازی هر یک از عوامل نه‌گانه مورد استفاده در پژوهش تهیه شد (شکل ۶). بر اساس شکل ۶، بیشینه ارزش دمای هوا در جنوبی‌ترین بخش حوضه و کمینه ارزش آن در شمالی‌ترین قسمت حوضه به چشم می‌خورد که بیانگر کاهش نسبی دمای هوای سالانه در روندی جنوبی-شمالی است. روند بارش در حوضه سیف‌آباد جهت شمال‌غربی-جنوب‌شرقی دارد. بدین ترتیب که بیشینه بارش در شمال‌غربی و کمینه بارش در جنوب‌شرقی اندازه‌گیری و ثبت شده است. لایه فازی شده شیب نمایشگر تغییرات ناهمگون شیب در حوضه است. کم‌شیب‌ترین منطقه که بیشترین ارزش فازی را به خود اختصاص داده است در غرب حوضه به شکل بیضی کشیده دیده می‌شود. در شرق و شمال حوضه نیز منطقه‌ای کم‌شیب دیده می‌شود که کوچک‌تر از مورد قبلی است. به نظر می‌رسد که این مناطق به دلیل شیب کمتر احتمال بیشتری برای کارستی شدن دارند. با توجه به تراکم بالای شبکه آبراهه‌ها در حوضه سیف‌آباد، تقریباً در تمامی مناطق حوضه فاصله از آبراهه‌ها یکنواخت است. کمترین ارزش این لایه مربوط به خط‌الرأس‌هاست که در آن‌ها بیشترین فاصله از شبکه آبراهه دیده می‌شود. بنابراین، این نقاط کمترین احتمال کارستی شدن را دارند. با توجه به لایه فازی شده تراکم آبراهه‌ها، بالاترین ارزش در این لایه متعلق به بخشی از شمال حوضه است که به صورت مناطقی پراکنده اما نزدیک به هم دیده می‌شوند. در شمال‌غرب حوضه نیز مناطق کوچک پراکنده‌ای با تراکم بالای شبکه آبراهه دیده می‌شود. نقشه‌های فاصله و تراکم فروچاله‌ها نمایشگر وجود منطقه‌ای با تعداد فروچاله‌های بسیار کم در شمال و تعدادی منطقه با تراکم زیاد فروچاله‌ها در کل حوضه است. این مناطق پرتراکم (که بالطبع فاصله از فروچاله‌ها در آن‌ها نیز کمینه است) در کل حوضه پراکنده‌اند، اما در غرب حوضه بزرگ‌ترین آن‌ها به چشم می‌خورد. نکته شایان توجه در مورد این فروچاله‌ها روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی آن‌هاست. بررسی لایه‌های گسل در منطقه نمایشگر سه منطقه با تراکم گسل کم است که در نقشه فاصله از گسل به رنگ مشکی دیده می‌شود. نکته قابل توجه در مورد این لایه‌ها انطباق بسیار قوی آن‌ها با شیب است، به طوری که مناطق کم‌شیب دارای بیشترین فاصله از گسل و کمترین تراکم گسل است.

نکته بسیار قابل توجه در مورد لایه‌های تراکم و فاصله آبراهه‌ها، فروچاله‌ها و گسل‌ها انطباق تقریبی آن‌ها بر همدیگر است. در این راستا سه منطقه بارز قابل شناسایی است که هر سه آن‌ها بر نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای و دره‌ای منطبق‌اند. ویژگی‌های این مناطق شیب کم، راستای شیب شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، تراکم گسلی کم و فاصله گسلی زیاد است. اما مورد بسیار مهم‌تر، تفاوت در فروچاله‌های این مناطق است. در منطقه‌های مستقر در بخش شرقی و غربی حوضه، تراکم فروچاله‌ها بسیار بالاست، اما در منطقه مستقر در شمال حوضه تراکم فروچاله‌ها به حدی کم است که کمترین تراکم فروچاله‌ها در این منطقه دیده می‌شود. همچنین، بیشترین تراکم آبراهه‌ها در منطقه شمالی دیده می‌شود، در حالی که دو منطقه دیگر تراکم آبراهه‌ای در حد متوسط دارند. این مسئله نشان می‌دهد که در حوضه سیف‌آباد لاغر ارتباط چندان قوی بین تراکم آبراهه‌ها، شیب، و تراکم فروچاله وجود ندارد.

به منظور تعیین اعتبار مدل و تعیین مناسب‌ترین ضریب گاما برای پهنه‌بندی شدت فرسایش آهکی در منطقه یون‌های کلسیم، منیزیم و سولفات برای کل منطقه درون‌یابی شد که با توجه به همبستگی بالای این یون‌ها با یکدیگر

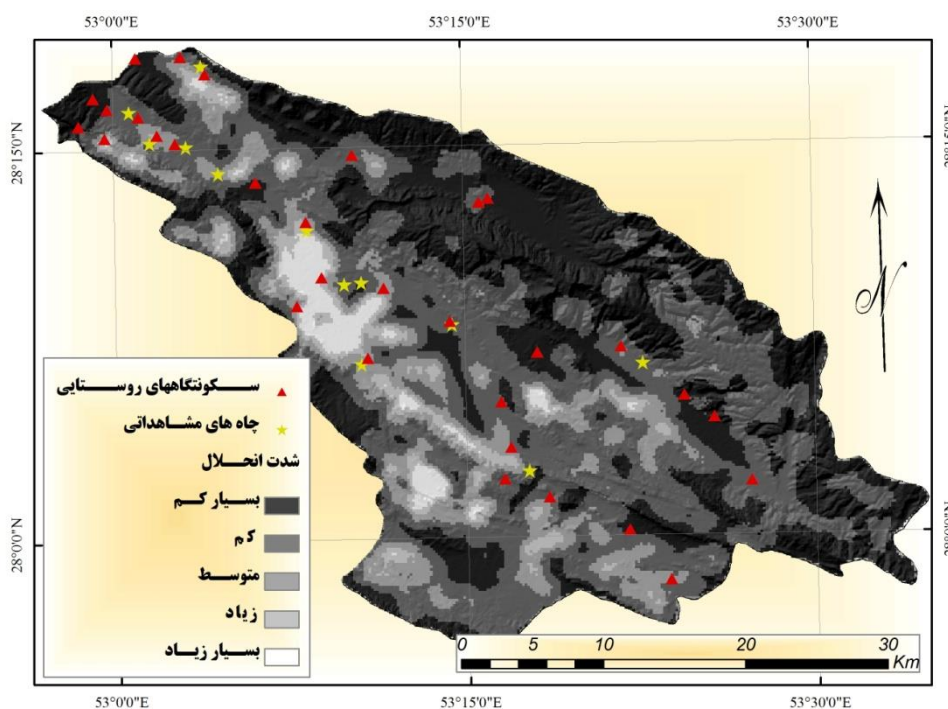
(ضریب همبستگی ۰/۸۷ و ۰/۹۲ برای یون‌های سولفات و منیزیم با یون کلسیم) تنها از یون کلسیم استفاده شد (شکل ۷). بر اساس شکل ۷، میزان یون کلسیم در منطقه از ۵ میلی‌گرم در لیتر تا ۱۵ میلی‌گرم در لیتر تغییر می‌کند که بیشترین میزان یون کلسیم ثبت‌شده در حد فاصل چاه‌های مارویه و تخته (در بخش میانی حوضه) به ثبت رسیده است. پس از آن، چاه‌های لاغر و گهلویه به ترتیب بیشترین میزان کلسیم را ثبت کرده‌اند. کمترین میزان یون کلسیم نیز در شمال‌غربی حوضه در حد فاصل چاه‌های نه تن تا کنارچاه کردیل به ثبت رسیده است (شکل ۷).

پس از تلفیق لایه‌های مختلف فازی‌شده با استفاده از ضرایب مختلف گاما و محاسبه ضرایب همبستگی بین هر لایه با لایه درون‌یابی‌شده میزان یون کلسیم موجود در آب، مقادیر همبستگی به دست آمد (جدول ۱). بر اساس جدول ۱ (با در نظر گرفتن درجه آزادی ۱۰۰) ضرایب همبستگی بیش از ۰/۱۹۵ در سطح ۰/۰۵ معنادار خواهند بود. بنابراین، تنها ضرایب گاما ۰/۴، ۰/۹، و ۱ به لحاظ آماری معنادارند. نکته بسیار قابل توجه، ضریب بالای همبستگی بین لایه تهیه‌شده با استفاده از ضریب گاما ۰/۴ و لایه یون کلسیم است که حاکی از ارتباط قوی این دو لایه (معناداری در سطح ۰/۰۱) و مناسب بودن این ضریب برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی میزان انحلال کارست در حوضه مورد بررسی است. در مورد سایر ضرایب گاما میزان همبستگی از ۰/۰۵۶۷ در گاما ۰/۶ تا ۰/۱۰۵۳۵۳ در گاما ۰/۸ تغییر می‌کند. به منظور بررسی بهتر روند تغییرات ضرایب همبستگی و اطمینان از انتخاب بهترین و مناسب‌ترین ضریب گاما، نمودار تغییرات ضرایب همبستگی تهیه شد (شکل ۸). بر اساس شکل ۸، تغییرات ضریب همبستگی از گاما ۰ (ضرب فاز) تا گاما ۱ (جمع فاز) منظم نیست. از گاما ۰ تا گاما ۰/۱ میزان تغییرات چندان مشهود نیست. از گاما ۰/۱ تا گاما ۰/۴ میزان ضریب همبستگی تقریباً نصف می‌شود، اما در گاما ۰/۴ ضریب همبستگی به ۰/۵۵۵۹ می‌رسد. پس از آن، ضریب همبستگی تا گاما ۰/۶ کاهش می‌یابد. از گاما ۰/۶ تا گاما ۱ ضریب همبستگی روندی افزایشی را طی می‌کند تا اینکه در گاما ۰/۹ و گاما ۱ ضریب همبستگی معنادار می‌شود.



شکل ۸. تغییرات ضرایب همبستگی بین لایه‌های تلفیق‌شده با ضرایب مختلف گاما و یون کلسیم

با توجه به انتخاب مناسب‌ترین ضریب گاما برای پهنه‌بندی میزان فرسایش انحلالی کارست در حوضه سیف‌آباد لاغر، خروجی منتج از تلفیق لایه‌های مورد استفاده با ضریب گاما ۰/۴ بر اساس انحراف از معیار به پنج دسته بسیار کم، کم، متوسط، زیاد، و بسیار زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۹). بر این اساس بیشترین میزان انحلال کارست در غرب حوضه سیف‌آباد لاغر، در حد فاصل چاه تخته تا لاغر (در غرب چاه طلا و سیف‌آباد) به وقوع می‌پیوندد. کمترین میزان فرسایش انحلالی کارست نیز در منطقه‌ای در شمال حوضه، و حاشیه‌های شمالی و شمال غربی حوضه سیف‌آباد محاسبه شده است. به‌طور کلی، پراکندگی فضایی مناطق با انحلال بالا و پایین دارای روند یکنواختی نیست و از متغیرهای پژوهش تبعیت می‌کند. با توجه به یکنواختی نسبی بارش و دما و فاصله و تراکم زهکشی در منطقه، به نظر نمی‌رسد که این عوامل نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان انحلال داشته باشند و تفاوت در میزان انحلال کارست در منطقه ناشی از سایر عوامل است. با بررسی دقیق‌تر، مشاهده می‌شود که مناطق با میزان انحلال کارستی زیاد بر مناطقی منطبق‌اند که تراکم فروچاله‌ها در آن بسیار زیاد و فاصله از فروچاله‌ها نیز کم است. همچنین، دیده می‌شود که تراکم گسل در مناطق نامبرده نسبتاً بالاست و علاوه بر آن شیب اندکی دارد. برعکس، مناطق شمالی که میزان انحلال کارستی پایینی دارند، تراکم گسل و فروچاله‌های کمی دارند و فاصله از گسل و فروچاله‌ها، همچنین شیب زمین در آن‌ها بالاست. همچنین، منطقه‌ای در شمال شرق حوضه دیده می‌شود که با توجه به تراکم بالای فروچاله‌ها و شبکه زهکشی از میزان انحلال کارستی بالایی برخوردار است (شکل ۹). در بررسی کلی‌تر، مشاهده می‌شود که جهت عمومی مناطق با فرسایش زیاد و کم از روند عمومی ناهمواری‌های حوضه تبعیت می‌کند، به‌طوری که امتداد این مناطق شمال غربی - جنوب شرقی است. علاوه بر این، مناطق با فرسایش کمتر از یکنواختی بیشتری برخوردار است و مناطق دارای فرسایش کمتر پراکنده‌ترند.



شکل ۹. نقشه شدت انحلال کارست در منطقه سیف‌آباد لاغر (بر اساس ضریب گاما ۰/۴)

به لحاظ انطباق مناطق فرسایشی بر زمین‌شناسی مشاهده می‌شود که منطقه بیشینه فرسایش انحلالی در حوضه سیف‌آباد بر نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای استقرار دارد. بخشی از منطقه دوم فرسایشی نیز بر سازندهای نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای و بخش دیگر آن بر گروه بنگستان انطباق دارد. نکته بسیار جالب در مورد منطقه بیشینه فرسایش انحلالی عدم انطباق کامل آن با منطقه کم‌شیب است. این منطقه، در غرب منطقه کم‌شیب میانی (با بیشترین تراکم فروچاله‌ها و کمترین شیب) اندازه‌گیری شد. این درحالی است که کمینه شدت فرسایش انحلالی کاملاً بر منطقه کم‌شیب شمال حوضه (با کمترین تراکم فروچاله‌ها) منطبق است. همچنین، بخشی از منطقه فرسایش کم بر نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای و مارن‌های منطقه استقرار دارد.

بررسی مساحت هر یک از طبقات انحلالی در حوضه سیف‌آباد لاغر نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد مساحت این حوضه فرسایش انحلالی کم، و بسیار کم دارد. تنها ۲/۸۲ درصد از مساحت کل حوضه در محدوده فرسایشی بسیار زیاد قرار می‌گیرد و ۳/۹۳ درصد مساحت حوضه نیز دارای فرسایش زیاد برآورد شده است (جدول ۲). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به لحاظ فرسایشی، حوضه در محدوده فرسایشی کم قرار دارد. این مسئله به علت کمبود نسبی بارش در سطح حوضه است.

جدول ۲. مساحت هر یک از طبقات فرسایشی بر حسب کیلومتر مربع و درصد در حوضه سیف‌آباد لاغر

طبقه فرسایشی	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
مساحت (کیلومتر مربع)	۴۷۵/۲۱۵۶	۵۲۷/۴۲۲۵	۱۵۸/۳۷۰۵	۴۸/۷۸۲۸۲	۳۵/۰۳۸۳۳۵
مساحت (درصد)	۳۸/۱۹	۴۲/۳۹	۱۲/۷۳	۳/۹۳	۲/۸۲

به منظور بررسی آثار جنس سازندها بر میزان فرسایش انحلالی کارستی در منطقه، درصد مساحت هر یک از سازندها به تفکیک طبقات فرسایشی (جدول ۳) و درصد مساحت هر طبقه فرسایشی به تفکیک سازند (جدول ۴) محاسبه شد. بر اساس جدول ۳، بیش از ۴۰ درصد نهشته‌های پادگانه‌ای در طبقه فرسایشی کم و ۲۰ درصد این رسوبات در طبقه فرسایشی متوسط قرار می‌گیرد. در حالی که سهم کنگلومرای بختیاری از این دو طبقه فرسایشی به ترتیب ۴۸ و ۱۴ درصد است. به علاوه، طبقه بسیار کم در کنگلومرا حدود ۱۱ درصد بیش از رسوبات پادگانه‌ای است. در سازند ماسه‌سنگی با رگه‌های آهک، طبقه کم بیش از ۶۵ درصد مساحت را به خود اختصاص داده است و سهم هر یک از طبقات بسیار کم و متوسط کمتر از ۱۵ درصد است. در رسوبات مارنی با رگه‌های گچ طبقات فرسایشی کم و بسیار کم در مجموع حدود ۹۰ درصد کل مساحت را پوشانده‌اند. این در حالی است که در آهک کرم رنگ با رگه‌های شیل، بیش از ۵۵ درصد مساحت در محدوده فرسایشی بسیار کم قرار می‌گیرد و سهم مجموع دو طبقه فرسایشی کم و متوسط از ۳۰ درصد نیز کمتر است.

نکته جالب این است که در حدود ۱۳ درصد این سازند آهکی در محدوده فرسایشی زیاد قرار می‌گیرد که در کل سازندها بیشترین است. طبقات فرسایشی بسیار کم و کم در سنگ‌های آهکی فسیل‌دار روی هم حدود ۸۰ درصد مساحت آن را می‌پوشاند. در آهک آسماری، طبقه فرسایشی کم و بسیار کم حدود ۹۰ درصد از کل مساحت تحت پوشش این

سازند را تشکیل می‌دهد. توزیع مساحت تحت پوشش در طبقات فرسایشی در گروه بنگستان متعادل‌تر از سایر سازندهاست، به طوری که اختلاف بین درصد تحت پوشش در این گروه از بقیه کمتر است و این سازندها در مقایسه با سایر سازندها و رسوبات بیشترین درصد را در محدوده فرسایشی بسیار زیاد نمایش می‌دهند (تقریباً ۹ درصد). در مقایسه‌ای نسبی، گروه بنگستان و رسوبات پادگانه‌ای بیشترین مساحت را در محدوده فرسایشی بسیار زیاد دارند و کمترین مساحت مربوط به آهک آسماری و کنگلومرای بختیاری است. در طبقه فرسایشی زیاد، آهک با رگه‌های شیل اختلاف زیادی با سایر سازندها دارد، اما اختلاف بین بقیه سازندها چندان نیست. در طبقه متوسط، به غیر از آهک آسماری و مارن گچ‌دار، اختلاف بین بقیه سازندها در حدود ۶ درصد است. در محدوده فرسایشی کم، تنها ۱۰ درصد آهک با رگه‌های شیل تحت پوشش قرار گرفته است، در حالی که در سایر سنگ‌ها و سازندها این میزان بین ۳۵ تا ۶۵ درصد تغییر می‌کند. در محدوده بسیار کم نیز غیر از ماسه‌سنگ آهک‌دار، بین ۲۲ تا ۵۸ درصد مساحت بقیه سازندها در این طبقه قرار دارد (جدول ۳).

جدول ۳. درصد مساحت هر یک از سازندها به تفکیک طبقه فرسایشی در حوضه سیف‌آباد لاغر

سازند	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد	جمع
نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای	۲۲/۸۳	۴۰/۸۸	۲۰/۹۷	۷/۹۷	۷/۳۵	۱۰۰
کنگلومرا با لایه‌های ماسه سنگ	۳۳/۴۷	۴۸/۶۱	۱۴/۲۴	۳/۶۰	۰/۰۷	۱۰۰
ماسه‌سنگ آهک‌دار با رگه‌های گچ	۱۳/۸۱	۶۵/۴۸	۱۶/۶۴	۲/۵۳	۱/۵۳	۱۰۰
مارن قهوه‌ای با رگه‌های گچ	۴۰/۷۰	۴۸/۷۷	۸/۸۲	۱/۵۶	۰/۱۶	۱۰۰
آهک کرم‌رنگ با رگه‌های شیل	۵۵/۶۲	۱۰/۰۴	۱۹/۲۶	۱۲/۹۲	۲/۱۵	۱۰۰
آهک فسفیل‌دار قهوه‌ای تا خاکستری	۳۹/۱۴	۴۱/۰۴	۱۴/۱۰	۵/۱۷	۰/۵۶	۱۰۰
آهک آسماری و جهرم	۵۷/۸۸	۳۵/۶۸	۵/۲۴	۱/۱۱	۰/۰۸	۱۰۰
گروه بنگستان (سنگ آهک و شیل)	۲۸/۲۵	۳۶/۰۴	۱۸/۹۳	۷/۸۲	۸/۹۶	۱۰۰

به لحاظ درصد نسبی هر یک از طبقات فرسایشی به تفکیک سازند، در طبقه فرسایشی بسیار کم، تقریباً ۵۱ درصد مساحت متعلق به آهک آسماری، بیش از ۱۹ درصد متعلق به مارن گچ‌دار و حدود ۱۸ درصد متعلق به نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای است. در محدوده طبقه فرسایشی کم نیز همین سه سازند بیشترین سهم را دارا هستند، با این تفاوت که نهشته‌های پادگانه‌ای بیش از ۳۰ درصد، آهک آسماری بیش از ۲۸ درصد و مارن گچ‌دار حدود ۲۱ درصد مساحت را به خود اختصاص داده‌اند. در طبقه متوسط، نهشته‌های پادگانه‌ای به تنهایی ۵۲ درصد از کل مساحت را دربرمی‌گیرند و سایر گروه‌ها (هر یک به تنهایی) کمتر از ۱۵ درصد مساحت را پوشش می‌دهند. در محدوده فرسایشی زیاد، سهم رسوبات پادگانه‌ای به بیش از ۶۴ درصد افزایش پیدا می‌کند و این رقم در طبقه فرسایشی بسیار زیاد به بیش از ۸۲ درصد می‌رسد. ناگفته نماند که به دلیل مساحت بیشتر سازندهای آسماری، مارن قهوه‌ای گچ‌دار و نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای، بیشتر بودن درصد این سازندها امری بدیهی است، اما تغییرات آن‌ها در طبقات فرسایشی مختلف معنادار است. نکته قابل تأمل

دیگر، درصد پوشش گروه بنگستان در طبقات فرسایشی مختلف است. این گروه، در طبقات فرسایشی بسیار کم و کم در حدود ۲/۵ درصد را می‌پوشاند که در طبقه متوسط این میزان به بیش از ۴/۵ درصد افزایش می‌یابد. در طبقه فرسایشی زیاد این میزان به بیش از ۶ درصد و در طبقه بسیار زیاد این میزان به ۹/۷ درصد می‌رسد که به نوبه خود قابل تأمل است. همچنین، به نظر می‌رسد که سازندهای آهکی ناخالص میزان بیشتری از مساحت تحت پوشش را به خود اختصاص داده‌اند که با توجه به مساحت کمتر آن‌ها، درصد بیشتری از مناطق را (به‌طور نسبی) تحت پوشش قرار داده‌اند (جدول ۴).

جدول ۴. درصد مساحت هر یک از طبقات فرسایشی به تفکیک سازند در حوضه سیف‌آباد لاغر

سازند	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای	۱۸/۹۴	۳۰/۵۳	۵۲/۱۷	۶۴/۳۴	۸۲/۶۵
کنگولورا با لایه‌های ماسه‌سنگ	۱/۷۴	۲/۲۸	۲/۲۲	۱/۸۲	۰/۰۵
ماسه‌سنگ آهک‌دار با رگه‌های گچ	۲/۹۹	۱۲/۷۷	۱۰/۸۱	۵/۳۴	۴/۴۹
مارن قهوه‌ای با رگه‌های گچ	۱۹/۴۳	۲۰/۹۶	۱۲/۶۲	۷/۲۴	۱/۰۳
آهک کرم‌رنگ با رگه‌های شیل	۱/۰۸	۰/۱۸	۱/۱۲	۲/۴۵	۰/۵۷
آهک فسیل‌دار قهوه‌ای تا خاکستری	۲/۴۴	۲/۳۰	۲/۶۴	۳/۱۴	۰/۴۸
آهک آسماری و چهرم	۵۱/۱۲	۲۸/۳۸	۱۳/۸۷	۹/۵۸	۱/۰۱
گروه بنگستان (سنگ‌آهک و شیل)	۲/۲۶	۲/۶۰	۴/۵۴	۶/۰۹	۹/۷۳
جمع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با رویکردی ترکیبی و با بهره‌گیری از شاخص‌های مختلف اقلیمی، ژئومورفیکی، و محیطی به پهنه‌بندی شدت انحلال کارست در حوضه سیف‌آباد لاغر پرداخته شد. نتایج بررسی نشان داد که وزن هر یک از عوامل در حوضه‌های مختلف متفاوت است. در حوضه سیف‌آباد لاغر بیشترین میزان تأثیرگذاری بر خروجی نهایی را تراکم فروچاله‌های بسته و پس از آن فاصله از فروچاله‌ها، و تراکم گسل و شیب داراست. با توجه به یکنواختی نسبی بارش، دما، تراکم آبراهه‌ها و فاصله از آبراهه‌ها و کم بودن نسبی بارش، این متغیرها تأثیر کمتری بر میزان انحلال کارست دارند. برای پهنه‌بندی شدت انحلال کارست، پس از فازی‌سازی لایه‌های مورد نظر، از روش گاما با استفاده از ضرایب متفاوت گاما استفاده شد.

نقطه قوت پژوهش حاضر ارزیابی خروجی‌های حاصل از تلفیق لایه‌ها با ضرایب مختلف گاما با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی و انتخاب مناسب‌ترین ضریب گاما برای پهنه‌بندی شدت فرسایش کارستی در منطقه مورد نظر است.

نتایج حاصل از بررسی روابط همبستگی بین لایه‌های یون کلسیم محلول در آب با خروجی‌های حاصل از تلفیق لایه‌ها نمایانگر توانایی قابل توجه ضریب گامای ۰/۴ در پهنه‌بندی میزان انحلال کارست در منطقه است. این نتایج

همچنین بیانگر برتری عملگر گامای فازی نسبت به دو عملگر ضرب و جمع فازی است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از نه متغیر مورد استفاده در پژوهش و به کارگیری روش تلفیق گاما با ضریب گامای ۰/۴ می‌توان با دقت قابل قبول و مناسبی شدت انحلال کارست در منطقه را پهنه‌بندی کرد. نتایج برگرفته از پهنه‌بندی شدت فرسایش آهکی نشان داد که بیش از ۸۰ درصد مساحت حوضه دارای فرسایش انحلالی کم و بسیار کم است و تنها ۶/۷۵ درصد از مساحت حوضه در محدوده فرسایشی بسیار زیاد و زیاد قرار می‌گیرد. بنابراین، در طبقه‌بندی کلی حوضه در محدوده فرسایشی کم قرار دارد. بیشترین میزان انحلال کارست در غرب حوضه (در حد فاصل چاه‌تخته تا لاغر) و کمترین میزان فرسایش انحلالی کارست نیز در منطقه‌ای در شمال حوضه، و حاشیه‌های شمالی و شمال غربی حوضه سیف‌آباد است. پراکندگی فضایی مناطق با انحلال بالا و پایین روند یکنواختی ندارد. همچنین، مشاهده می‌شود که بیشینه فرسایش انحلالی بر نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای و بخشی از منطقه دوم فرسایشی نیز بر سازندهای نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای و بخش دیگر آن بر گروه بنگستان انطباق دارد. به علاوه، بیش از ۶۰ درصد مساحت نهشته‌های پادگانه‌ای در محدوده فرسایشی کم و بسیار کم قرار می‌گیرد، در حالی که سهم کنگلومرا از این دو گروه حدود ۸۰ درصد، سهم ماسه‌سنگ حدود ۷۸ درصد، سهم مارن حدود ۸۸ درصد و سهم سازندهای آهکی از ۶۴ درصد (در گروه بنگستان) تا ۹۳ درصد (در آهک آسماری) متغیر است.

به لحاظ درصد نسبی هر یک از طبقات فرسایشی به تفکیک سازند، در طبقه فرسایشی کم بیش از ۵۰ درصد مساحت متعلق به آهک آسماری است، در حالی که در طبقه کم‌نهشته‌های رسوبی پادگانه‌ای حدود ۳۰ درصد و آهک آسماری بیش از ۲۸ درصد مساحت را به خود اختصاص داده‌اند. سهم نهشته‌های رسوبی از طبقه متوسط نیز بیش از ۵۰ درصد، از طبقه زیاد حدود ۶۴ درصد و از طبقه بسیار زیاد حدود ۸۳ درصد است. باید اشاره کرد که یکی از دلایل فزونی نسبی فرسایش آهکی در این سازند مساحت نسبتاً زیاد آن است. نکته شایان توجه در سازندهای آهکی، درصد زیاد سازندهای گروه بنگستان در طبقه فرسایشی بسیار زیاد است. می‌توان نتیجه گرفت که در سازندهای غیرآهکی بیشترین و کمترین میزان فرسایش به ترتیب در طبقه رسوبات پادگانه‌ای و کنگلومرا و در سازندهای آهکی بیشترین فرسایش متعلق به گروه بنگستان و کمترین میزان فرسایش متعلق به آهک آسماری است. باید به این موضوع توجه شود که در مطالعه حاضر سن سازندها و سنگ‌های منطقه و درجه خلوص آن‌ها بررسی نشده است. بدیهی است در صورت افزایش متغیرهای مورد بررسی و در نظر گرفتن سن، خلوص، و ضخامت لایه‌های آهکی در پژوهش‌های بعدی، امکان انتخاب مدل دقیق‌تری برای پهنه‌بندی شدت انحلال کارست نیز وجود خواهد داشت.

منابع

- افراسیابیان و همکاران، (۱۳۷۳). فرهنگ چندزبانه واژه‌های کارست. وزارت نیرو - تماب، سازمان تحقیقات منابع آب. پورا احمد، ا.، حبیبی، ک.، محمد زهرایی، س.، نظری عدلی، س. (۱۳۸۶). استفاده از الگوریتم‌های فازی و GIS برای مکان‌یابی تجهیزات شهری (مطالعه موردی: محل دفن زباله شهر بابلسر). محیط‌شناسی، شماره ۴۲، ۳۱-۴۲.
- تقیان، ب.، رزمخواه، ه.، قرمز چشمه، ب. (۱۳۹۰). بررسی تغییرات منطقه‌ای بارش سالانه با کاربرد روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: استان فارس). مهندسی منابع آب، سال چهارم، تابستان، ۲۹-۳۸.

- حسینی، ه.، کرم، ا.، صفاری، ا.، قنواتی، ع. (۱۳۹۰). ارزیابی و مکان‌یابی جهات توسعه فیزیکی شهر با استفاده از مدل منطق فازی (مطالعه موردی: شهر دیواندره). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۲۰، شماره ۲۳، زمستان، ۶۳-۸۳.
- جعفریگلو، م.، مقیمی، ا.، صفری، ف. (۱۳۹۰). استفاده از DEM در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پراو- بیستون. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۲، شماره پیاپی ۴۴، شماره ۴، زمستان، ۱-۱۸.
- رضازاده ورقچی، ف.، خاشعی سیوکی، ع.، شجاعی سیوکی، ح. (۱۳۸۹). بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت مشهد به منظور ارزیابی شاخص‌های آب شرب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، اردیبهشت، ۱-۱۵.
- رضایی، م.، نخعی، م. (۱۳۸۷). نحوه تشکیل غار کتله‌خور در استان زنجان. زمین‌شناسی ایران، سال ۲، شماره ۶، ۱۱-۱۹.
- شاد، ر.، عبادی، ح.، مسگری سعدی، م.، وفائی‌نژاد، ع. (۱۳۸۸). طراحی و اجرای GIS کاربردی جهت مکان‌یابی شهرک‌های صنعتی با استفاده از مدل‌های فازی، وزن‌های نشانگر و ژنتیک، دانشکده فنی، شماره ۴۳، ۴۷-۵۵۹.
- شعبانی، م. (۱۳۹۰). ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در تهیه نقشه‌های کیفی آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی آن‌ها (مطالعه موردی: دشت نی‌ریز، استان فارس). جغرافیای طبیعی لار، سال ۴، شماره ۱۳، پاییز، ۸۳-۹۶.
- طاهری، ک. (۱۳۸۴). گزارش عملکرد سالیانه دفتر مطالعات و تحقیقات کارست غرب کشور. شرکت آب منطقه‌ی کرمانشاه، معاونت مطالعات پایه منابع آب، آرشیو داخلی، ۳۰-۴۵.
- علایی طالقانی، م. (۱۳۸۳). توزیع فضایی سنگ‌های کارستی در ایران، معاونت پژوهشی دانشگاه رازی.
- علایی طالقانی، م.، رحیم‌زاده، ز. (۱۳۸۹). بررسی تحول کارست در منطقه زاگرس. نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، اردیبهشت، ۳۲۹-۳۴۰.
- فروودی، ر. (۱۳۷۳). رابطه تکتونیک و کارست‌های منطقه ایچ- استهبان. تهران، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، مجموعه مقالات، ۲۷۹-۲۸۳.
- قبادی، م.ح.، عبدی‌لر، ی.، محبی، ی. (۱۳۹۰). اهمیت شناخت خصوصیات ژئومورفولوژیکی، سنگ‌شناسی و فیزیکی سنگ‌های کربناته، زمین‌شناسی کاربردی، دانشگاه آزاد زاهدان، سال ۷، شماره ۴، ۲۹۹-۳۱۰.
- لاله زاری، ر.، طباطبایی، ح.، یارعلی، ن. (۱۳۸۸). بررسی تغییرات ماهانه نیترات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد و پهنه‌بندی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. پژوهش آب ایران، سال ۳، شماره ۴، بهار و تابستان، ۹-۱۷.
- مقصودی، م.، حاجی‌ملکی، صفری، ف.، چهارراهی، ذ. (۱۳۸۸). بررسی توسعه کارست در توده پراو بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۹، پاییز ۱۳۸۸، ۵۱-۶۵.
- ملکی، ا. (۱۳۸۸). شناسایی مناطق مساعد آلودگی آب‌های زیرزمینی به کمک پهنه‌بندی کارست با GIS (مطالعه موردی استان کرمانشاه). علوم زمین، تابستان، سال ۱۸، شماره ۷۲، ۲۵-۳۲.
- ملکی، ا.، شوهانی، د.، علایی طالقانی، م. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه، مدرس علوم انسانی، بهار ۱۳۸۸، شماره ۶۰، ۲۷۱-۲۹۶.
- ولایتی، س.، خانعلی‌زاده، ف. (۱۳۹۰). بررسی رابطه ساختارهای تکتونیک و اشکال کارستی در حوضه آبریز کارده، جغرافیا، دوره جدید، سال ۹، شماره ۳۱، ۱۷۱-۱۸۹.
- Cao, J.H., Yuan, D.X. et al. (2005). **Karst ecosystem of southwest China constrained by geological setting**, Geology Press, Beijing, 98- 116.
- Furlani, S., Cucchi, F., Forti, F., Rossi, A. (2009). **Comparison between coastal and inland Karst limestone lowering rates in the northeastern Adriatic Region (Italy and Croatia)**, Geomorphology, Vol. 104, No. 1-2, 73-81.
- Gunn, J. (2013). **Denudation and Erosion Rates in Karst**, Treatise on Geomorphology, Vol. 6, 72-81.

- Heather, A.V. (2003). **Conceptual modeling of the impacts of climate change on karst geomorphology in the UK and Ireland**, Journal for Nature Conservation, Vol. 11, No 1, 59-66.
- INkpen, R., Viles, H., Moses C., Baily B. (2012). **Modelling the impact of changing atmospheric pollution levels on limestone erosion rates in central London, 1980–2010**, Atmospheric Environment, Vol. 61, 476-481.
- KLimchouk, A.B. (2013). **Evolution of intrastratal karst and caves in gypsum**, Treatise on Geomorphology, Vol. 6, 438-450.
- KRanjc A. (2013). **Classification of closed depressions in carbonate karst**, Treatise on Geomorphology, Vol. 6, 104-111.
- MAtsushi, Y., Sasa, K., Takahashi, T., Sueki, K., Nagashima, Y., Matsukura, Y. (2010). **Denudation rates of carbonate pinnacles in Japanese karst areas: Estimates from cosmogenic ^{36}Cl in calcite**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 268, No 7–8, 1205-1208.
- Mull, D.S. et al. (1988). **Application of dye – tracing techniques for determining solute transport characteristics of Groundwater in Karst terrains**.
- Panno, S.V., Hackley K.C., Hwang H.H., Kelly W.R. (2001). **Determination of the sources of nitrate contamination in karst springs using isotopic and chemical indicators**, Chemical Geology, Vol. 179, No. 1–4, 113-128.
- Plan, L. (2005). **Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps**, Geomorphology, Vol. 68, No. 3–4, 201-212.
- Quinlan, J. (1989)., **Groundwater monitoring in Karst terrains**, EPA. 600/ x
- Selby, M.J. (1985). **Earth changing surface: an introduction to geomorphology**, Clarnbon press: Oxford.
- Stone, J., Allan, G.L., Fifield, L.K., Evans, J.M., Chivas, A.R. (1994). **Limestone erosion measurements with cosmogenic chlorine-36 in calcite — preliminary results from Australia**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 92, No. 1–4, 311-316.
- White, W.B. (1988). **Geomorphology and Hydrology of Karst**, Oxford University press.
- Xiong, Y. J., Qiu, G.Y., Mo, D.K., Lin, H., Sun, H, Wang, Q.X., Zhao, S.H. Yin, J. (2009). **Rocky desertification and its causes in karst areas: a case study in Yongshun County, Hunan Province, China**, Environmental Geology, June, Vol. 57, No.7, 1481-1488.