پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال ششم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹٦
صص. ۳۹-۲۱

ارزیابی و پهنه‌بندی تحول کارست حوضه آبریز غار سهولان مهاباد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

سعید خضری*- دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه کردستان.
هیمن شهابی - استادیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه کردستان.
سارا محمدی- دانشجوی کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشگاه کردستان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲ تائید نهایی: ۱۳۹۶/۰۵/۲۰

چکیده

شناخت عوامل مؤثر در تحول کارست و پهنه‌بندی تحول آن در زمینه مطالعات مربوط به منابع آب کارست دارای جایگاه ویژه‌ای است. هدف از این پژوهش ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل توسعه کارست در محدوده غار سهولان در جنوب شرق شهرستان مهاباد در استان آذربایجان غربی با استفاده از روش AHP می‌باشد. در این تحقیق لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و کاربری اراضی به‌عنوان نقشه‌های عامل در نظر گرفته شدند. همچنین به‌منظور استخراج مدل پتانسیل توسعه کارست، لایه‌های فوق در محیط GIS فراخوانی شدند. لایه‌های اطلاعاتی مختلف با اعمال قضاوت کارشناسی (به‌ویژه با عنایت به وجود غار سهولان به‌عنوان برجسته‌ترین شاهد پالئوکارست) و اختصاص وزن به هر لایه در نرم‌افزار Expert Choice و بازدیدهای میدانی به‌صورت نقشه‌های معیار طبقه‌بندی شدند. درنهایت با توجه به وزن به‌دست‌آمده نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که از کل مساحت حوضه آبریز غار، ٤۲/۸۸ درصد در طبقه کمتر توسعه‌یافته، ۳۳/۳۷ درصد در طبقه توسعه‌نیافته، ۱٦/۹۲ درصد در طبقه متوسط و ٦/۸۳ درصد در طبقه توسعه‌یافته قرارگرفته است. ازاین‌رو، عامل لیتولوژی منطقه باارزش ۰/٦٦۷ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده پتانسیل توسعه کارست در منطقه موردمطالعه بوده است و عامل کاربری اراضی باارزش ۰/۰٤۳ کمترین وزن را به خود اختصاص داده است که کمترین تأثیر را در کارست زایی کنونی حوضه به خود اختصاص داده است. نتایج نشانگر آن است که به ترتیب عوامل زمین شناسی، هیدرولوژی، توپوگرافی و عوامل انسانی مهم‌ترین نقش را در توسعه کنونی کارست در این منطقه داشته‌اند و وجود غار سهولان به‌عنوان شاهد برجسته پالئوکلیمایی بر نقش فاکتورهای اقلیمی دیرین در توسعه کارست گذشته منطقه دلالت دارد.

واژگان کلیدی: پتانسیل کارست، روش تحلیل سلسله مراتبی، پهنه‌بندی، غار سهولان.

* نویسنده مسئول: E-mail: skhezri@uok.ac.ir

مقدمه

اصطلاح کارست برای توصیف نوع خاصی از چشم‌اندازها به کار می‌رود که دارای اشکال سطحی، غارها و سیستم‌های آب زیرزمینی هستند. این چشم‌اندازها و اشکال در سنگ‌های قابل‌حل مانند سنگ‌آهک، دولومیت، مرمر (سنگ‌های کربناته)، ژیپس و نمک (سنگ‌های تبخیری) شکل می‌گیرند (وایلی و همکاران[۱]، ۲۰۱۵). کارست ناحیه‌ای است که هیدرولوژی و مورفولوژی ویژه‌ای دارد که علت این ویژگی‌ها حلالیت بسیار زیاد در آن و توسعه تخلخل ثانویه و نقش عوامل تکتونیکی در توسعه آن است (فورد و ویلیامس[۲]، ۱۹۸۹). در مناطق کارستی به‌عنوان نمونه در توسعه غارها عوامل مختلفی دخالت دارند که از آن جمله می‌توان به بارش، دما، میزان دی اکسیدکربن، تکتونیک، ضخامت لایه سازند کارستی و خصوصیات چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی اشاره کرد (وایت[۳]، ۱۹۸۸). شکل‌گیری یک سیمای کارستی متضمن وجود دو عامل است: اول اینکه توده سنگ قابلیت انحلال داشته باشد، دوم اینکه زمینه تشکیل یک سیستم جریان آب زیرزمینی فراهم گردد (قبادی، ۱۳۸۸، ۵). لندفرم‌های کارستی عمدتاً در مناطقی با سنگ‌بستر کربناتی قابل‌حل به‌وسیله انحلال شیمیایی آب با اسیدیته کم شکل می‌گیرند (پالمر[۴]، ۲۰۰۷). عوامل و فرآیندهای مختلفی تکامل کارست را تحت تأثیر قرار می‌دهند. توپوگرافی، لیتولوژی و ویژگی‌های زمین‌ساختی به‌عنوان عوامل منفعل عمل می‌کنند و فرآیندهای دیگری مانند: زمین‌ساخت فعال، فرآیندهای هیدرولوژیکی(وابسته به اقلیم)، انحلال زیستی (وابسته به محیط‌زیست) و فرآیندهای ژئومورفولوژی (هوازدگی، شیب، آبراهه‌ها و یخبندان) به‌طور فعال در توسعه اشکال کارست نقش دارند (کالیک[۵]، ۲۰۱۱). توپوگرافی تیپیک کارست، با زهکشی زیرزمینی در ارتباط است بنابراین کارست ارتباط تنگاتنگی با ژئومورفولوژی و هیدرولوژی دارد (وایلی و همکاران[۶]، ۲۰۰۹). اهمیت پهنه‌های کارستی طی دو دهه اخیر آشکارتر شده است و ازجمله کاربرد غارشناسی و مطالعات مربوط به آن در آب‌شناسی، در تعیین آب‌های زیرزمینی، جلوگیری از خرابی شهرها و روستاها بر اثر سیلاب و طغیان رودخانه‌ها در زمین‌های آهکی اهمیت دارد. همچنین در ساخت سدها؛ بناها، ساختمان‌ها، مترو، تونل‌ها، خطوط راه‌آهن و تعیین چینه‌شناسی، دیرینه‌شناسی، کشف بقایای جانوری و آثار انسان‌های اولیه دارای اهمیت بوده و ازنظر زیست‌شناسی و مطالعه گونه‌های گیاهی و جانوران غارزی درگذشته و حال، وجود غار نهشته‌های زیبا و فراوان در جذب توریست نقش بسیار مهمی دارد. با توجه به اهمیت مناطق کارستی، پژوهش‌های به نسبت جامعی در جهان در رابطه با کارست و غار صورت گرفته است که در این میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در مطالعات تحول مناطق کارستی هانگ و همکاران[۷] (۲۰۰۲) با استفاده از تکنیک RS و GIS موقعیت و رابطه تشکیل غار با زون شکستگی در منطقه کارستی حوضه سیومیو، واقع در شمال غربی ویتنام را بررسی کردند. آن‌ها در مطالعه تحول کارست جهت استخراج خطواره‌ها از باند پانکروماتیک سنجنده ETM با سایر باندها استفاده کردند و نشان دادند که زون شکستگی، محل مناسب جهت توسعه غار است، همچنین نشان دادند، فاصله بین غارها و گسل‌ها به‌خوبی انطباق بین رخداد غارها و زون شکستگی‌ها را مشخص می‌سازند.

تیرلا و ویجولی[۸](۲۰۱۳) در مطالعه توسعه و تحول کارست به بررسی آهک‌های ریفی ژوراسیک بالایی، متعلق به سازند مونت پیاترا پرداخته‌اند. به نظر آنان در آهک‌های طاقدیسی که منطبق بر خط الراس بوده و دارای شکستگی‌های کششی عرضی عمود برجهت لایه‌بندی‌ها هستند عامل مهم توسعه کارست می‌باشند.

---

۱ Waele et al

[1] Ford and Williams

[2] White

[3] Palmer

[4] Calic

[5] Waele et al

۷ Hung et al

۸ Tirla and Vijulie

مقصودی و همکاران[۱] (۲۰۱۶) در پژوهشی به ارزیابی فاکتورهای مؤثر در توسعه و پهنه‌بندی کارست در منطقه پالنگان در استان کردستان با استفاده از روش‌های منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی پرداخته‌اند. آن‌ها در پژوهش مذکور جهت بررسی توسعه کارست از هشت فاکتور شامل گسل، شیب، جهت شیب، ارتفاع، رودخانه، پوشش گیاهی و اقلیم استفاده نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بخش‌های جنوبی و غربی منطقه موردمطالعه به علت وجود شبکه گسلی متنوع و شرایط آب و هوایی مرطوب دارای بیشترین پتانسیل توسعه کارست بودند ولی بخش‌های شمالی و شرقی به دلیل عدم وجود تشکیلات آهکی و شرایط آب و هوایی نیمه مرطوب دارای کمترین پتانسیل توسعه کارست بودند.

ژنگ و همکاران[۲] (۲۰۱۶) به ارزیابی تأثیرات آب و هوایی بر روی کربن موجود در مناطق کارستی جنوب غربی چین در بازه زمانی ۱۹۷۰–۲۰۱۳ با استفاده از روش انحلال بالقوه حداکثر[۳] (MPD) و GIS پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که کربن موجود در مناطق کارستی می‌تواند به تغییرات آب و هوایی آینده، سریع واکنش نشان دهد.

کوین و همکاران[۴] (۲۰۱۷) در پژوهشی به مخاطرات زمینی مربوط به کارست در حوضه دلوار، تگزاس آمریکا همراه با تکنیک‌های ژئوفیزیکی و سنجش‌ازدوری پرداختند. ترکیب مطالعات میدانی رایج با آشکارسازی پدیده‌های کارستی بر روی تصاویر مادون‌قرمز رنگی و لیدار به‌خوبی نشان داد که زمین‌های ژیپسی کارستی می‌توانند در مقیاسی بزرگ‌تر با استفاده از این تکنولوژی در محیط‌های خشک با تراکم پوشش گیاهی کم به‌خوبی نشان داده بشوند.

در ایران نیز تحقیقات در زمینه توسعه و تحول مناطق کارستی به‌عمل‌آمده است. ملکی و همکاران(۱۳۸۸) در مطالعه‌ای تحت عنوان پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه از پنج روش همچون تراکم سطحی، ارزش اطلاعاتی، روش تجربی و روش آماری تحلیل سلسله مراتبی نتایج ارزشمندی به دست آوردند. آنان از بین عوامل مختلف دخیل در تحول کارست استان کرمانشاه پارامترها و عوامل زیر را مورداستفاده قرار داده‌اند: ارتفاع، لیتولوژی، ژئومورفولوژی(زمین‌ساخت)، دما، بارش، تبخیر و شیب.

مرادی و همکاران(۱۳۸۹) به بررسی تأثیر عوامل مختلف توسعه کارست در پهنه‌های کارستی زاگرس پرداخته‌اند. بدین منظور از لایه‌های اطلاعاتی: لیتولوژی، چگالی خطواره‌ها، شیب، بارش، دما، پوشش گیاهی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند و پتانسیل کارستی شدن را استخراج و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داده‌اند. در تحقیق مزبور لایه‌های اطلاعاتی مختلف با اعمال قضاوت کارشناسی و بازدیدهای صحرایی به‌صورت نقشه‌های معیار طبقه‌بندی‌شده‌اند. سپس با روش همپوشانی وزن‌دار شده و باهم تلفیق‌شده‌اند. در این پژوهش وزن هر لایه با توجه به تأثیری که آن لایه در توسعه کارست دارد به‌صورت درصد یا نقشه، توسعه کارست را در سازندهای مختلف دارای پتانسیل نشان می‌دهد.

خانلری و مؤمنی(۱۳۹۱) به مطالعه ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین غرب ایران پرداختند که با مطالعات کتابخانه‌ای و تحلیل‌های نرم‌افزاری به این نتیجه رسیدند که تکتونیزه شدن شدید در این منطقه و گسترش سنگ‌های کربناته انحلال‌پذیر باعث گسترش کارستی شدن و شکل‌گیری پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست شده است.

قره خوانی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی توسعه کارست و غارهای کارستی در استان آذربایجان شرقی پرداخته‌اند. در این تحقیق نقش عوامل ساختاری (تکتونیک) و لیتولوژی در توسعه اشکال کارستی ازجمله غارهای آذربایجان شرقی موردبررسی قرارگرفته‌اند. نتایج حاصل از کار آن‌ها نشان می‌دهد که ۱۵/۲ درصد از مساحت آذربایجان را واحدهای کارستی تشکیل

---

[5] Zeng et al

[6] Maximal potential dissolution

[۱] Maghsoudi et al

[7] Kevin et al

می‌دهد و بیشترین مساحت واحدهای کارستی مربوط به سازندهای نمکی و ژیپسی با (۸/۶) درصد از مساحت استان و کمترین آن مربوط به سازند دولومیتی با (۰/۰۳) درصد است. مطالعه و بررسی پدیده‌های ژئومورفولوژیک و عوامل مؤثر در پیدایش، تحول و تکوین اشکال درون کارست از دیدگاه کاربردی دارای اهمیت فراوانی است. برنامه‌ریزی برای استفاده از این محیط، نیازمند بررسی همه جانبهٔ عوامل و فرآیندهای مؤثر در شکل‌گیری این قبیل عوارض ژئومورفولوژیک است.

قبادی و بهزادتبار (۱۳۹۵) به ارزیابی توسعه کارست بر اساس ویژگی‌های لیتولوژیکی، مورفولوژیکی و ساختاری در چهار نقطه منطقه بید سرخ، شرق صحنه در شرق استان کرمانشاه پرداختند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که گسلش از عوامل مهم ایجاد غارشدگی در منطقه موردمطالعه بوده است. همچنین بررسی انجام‌شده نشان داد که اشکال غالب انحلالی در ایستگاه اول کانال‌ها و شیارهای انحلالی، میکروکارن ها در ایستگاه دوم، غار در ایستگاه سوم و میکروکارن و میکروحفره ها در ایستگاه چهارم بودند. همچنین از میان عوامل تأثیرگذار بر روی کارستی شده منطقه موردمطالعه، ترکیب مناسب سنگ‌شناسی، ناپیوستگی‌های متعدد و متنوع، شرایط آب و هوایی، نوع اقلیم (نیمه‌خشک) ناحیه و فراوانی پدیده‌های ژئومورفولوژیکی بر توسعه کارست در منطقه دلالت داشتند.

بهرامی و دیگران (۱۳۹۵) به ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در تاقدیس قلاجه و توده پراو بیستون زاگرس پرداختند. نتایج پژوهش مذکور نشان‌دهنده‌ی ارتباط نزدیک بین لیتولوژی و شکستگی‌ها با رفتار هیدرولوژی سیستم آب زیرزمینی در زاگرس چین‌خورده، و عدم ارتباط نزدیک بین شکستگی و لیتولوژی در سیستم رورانده بوده است. همچنین با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیک و منحنی فرود چشمه‌ها، درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست در محدوده‌ی پراو- بیستون ۵ تا ۶ تعیین شد. برای آبخوان کارستی قلاجه درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست ۲/۵ تا ۳ تعیین شد. همچنین تجزیه‌وتحلیل آهک‌های دو محدوده و نیز آنالیز شیمیایی آب چشمه موردمطالعه نشان‌دهنده‌ی خلوص بالای آهک بیستون نسبت به آهک آسماری و درنتیجه وجود جریان انتشاری-مجرایی در بیستون در مقایسه با رژیم انتشاری در آبخوان کارستی قلاجه بوده است.

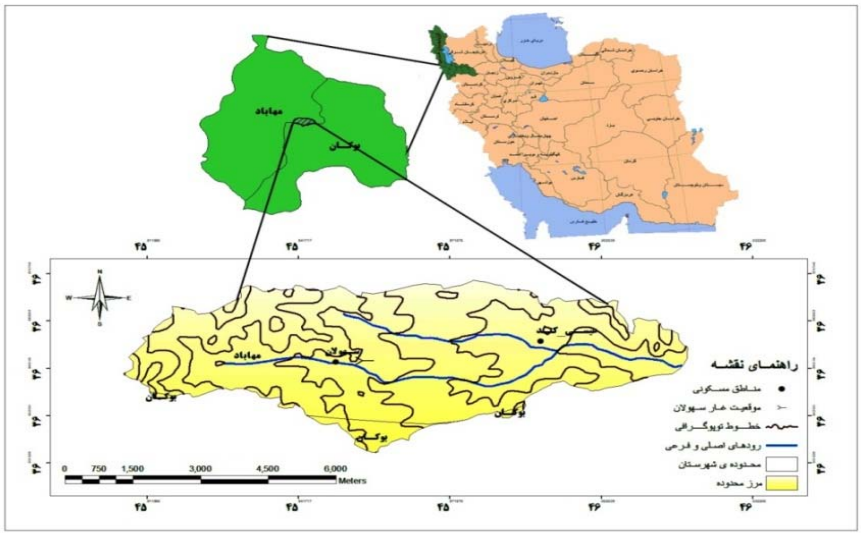
در این پژوهش با توجه به مطالعات انجام‌شده خارجی و داخلی و با توجه به وجود نقش پالئو کلیما و تفاوت زیاد اقلیم دیرین این منطقه با آب‌وهوای حاکم کنونی در تحول کارست در منطقه و وجود شاهد برجسته کارستی پالئوکلیما (غار سهولان) به گزینش فاکتورهای مهم و حتی‌الامکان مشترک روش‌های رایج عوامل زیر برای این مطالعه مدنظر قرارگرفته‌اند:

زمین‌شناسی(لیتولوژی، فاصله از گسل)، هیدرولوژی(فاصله از آبراهه)، توپوگرافی(جهت شیب، ارتفاع، شیب)، عوامل انسانی و کاربری اراضی (باغ، کشاورزی، زمین بایر، جاده، روستا).

هدف از انجام این مطالعه بررسی نقش عوامل مؤثر در توسعه کنونی کارست در حوضه غار سهولان در جنوب شرق شهرستان مهاباد در استان آذربایجان غربی با بهره‌گیری از GIS و تأکید بر روش تحلیل سلسله مراتبی در پهنه‌بندی تحول و توسعه کارست می‌باشد.

منطقه موردمطالعه

غار آبی سهولان به‌عنوان برجسته‌ترین شاهد کارست پالئوکلیمای منطقه پژوهش در شمال غرب ایران و در۴۳ کیلومتری جنوب شرق شهر مهاباد با مختصات جغرافیایی ″۲۱ ′۳۹ °۳۶ شمالی و ″۱۳ ′۵۷ °۴۵ شرقی واقع‌شده است (شکل ۱). غار سهولان بعد از غار علی‌صدر همدان دومین غار آبی ایران به شمار می‌آید. این غار در منطقه‌ای کوهستانی و مرتفع قرار دارد و شاهدی بر توسعه‌یافتگی کارستی منطقه درگذشته و زمان کنونی می‌باشد.



شکل۱: نقشه موقعیت و جایگاه جغرافیایی غار سهولان مهاباد

دسترسی به این غار از طریق جاده مهاباد – بوکان (جاده بورهان) و سه‌راهی روستای عیسی کند امکان‌پذیر است. از سه‌راهی مذکور جاده فرعی آسفالته به سمت روستا و غار سهولان کشیده شده است. غار سهولان در دامنه کوهی به نام قوتر به ارتفاع ۲۲۲۲ متر قرارگرفته است. دهانه اصلی غار در محلی به نام کونه کوتر می‌باشد که محل زندگی تعداد زیادی کبوتر است که درواقع بخش آبی غار است که ارتفاع دهانه آن از سطح دریاهای آزاد ۱۷۶۶ متر می‌باشد.

محوطه ورودی غار به‌صورت قطعه زمین هموار، نعلی شکل است، که هر دو دهانه غار در آن قرار دارند. دهانه بخش خشک غار در فاصله نه‌چندان دور و در ارتفاعی بالاتر قرار دارد که مدخلی تنگ و باریک است و کونه مالان نام دارد که ارتفاع آن ۱۷۹۵ متر برآورد شده است. غار در داخل سنگ‌های آهکی– دولومیتی به سن پرمین تشکیل یافته است و دارای دو بخش خشک و آبدار می‌باشد. آثار بالا بودن سطح آب این غار درگذشته این غار باقی است. در طی تکامل غار، سطح آب غار پایین رفته و موجب ایجاد فضایی گردیده که در آن گذرگاه‌ها و اتاقک‌ها به‌جای مانده‌اند (شکل ۲).

شکل۲: عکس چپ دهانه بخش خشک(کونه مالان) و عکس راست دهانه بخش آبدار(کونه کوتر) غار سهولان را نشان می‌دهند.

روش تحقیق

این مقاله بر روش میدانی، کتابخانه‌ای و دفتری متکی است. نخست با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی محدوده غار موردمطالعه مشخص شد. از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ خلیفان و بوکان و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰

مهاباد جهت استفاده در شناسایی عوارض و سازندها استفاده شد. در این تحقیق به استناد منابع و بر اساس درجه اهمیت عوامل مؤثر در تو سعه کار ست در منطقه غار سهولان فاکتورهای مهم گزینش شدند. با توجه به نقش عوامل مختلف و تو سعه کار ست درگذ شته منطقه و با عنایت به پالئوکلیمای متفاوت گذ شته منطقه با و ضعیت کنونی و نقش عوامل مختلف در توسعه کارست هفت لایه اطلاعاتی انتخاب شدند. لازم به ذکر است که در مطالعات قبلی نیز(که حتی در سطح استانی صورت گرفته) به عامل انحلالیت سنگ‌ها در انواع مدل‌ها و روش‌های تحول و تو سعه کار ست به‌عنوان یک پارامتر در پهنه‌بندی تو سعه کار ست شمال غرب و غرب ایران اشاره‌ای نشده است(ملکی و همکاران،۱۳۸۸). آنان در مطالعه‌ای تحت عنوان پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه از روش‌هایی همچون تراکم سطحی، ارزش اطلاعاتی، روش تجربی و روش آماری تحلیل سلسله مراتبی در تحول کار ست ا ستفاده کرده‌اند و نتایج ارز شمندی هم به د ست آوردند و از بین عوامل مختلف دخیل در تحول کارست استان کرمانشاه پارامترها و عوامل زیر را مورداستفاده قرار داده‌اند: ارتفاع، لیتولوژی، ژئومورفولوژی(زمین‌ساخت)، دما، بارش، تبخیر و شیب.

لذا با استناد به منابع و با توجه به کم وسعت بودن منطقه پژوهش(۲۶ کیلومترمربع) و تنوع کم سنگ‌های منطقه و غلبه با آهک به‌عنوان سنگ غالب منطقه، از استخراج درجه انحلالیت صرف‌نظر گردید و بر اساس مطالعات میدانی و یکسان بودن سنگ‌ها در منطقه پژوهش، عوامل دیگر بااهمیت‌تر برآورد شدند. چون ارتفاع به‌عنوان یکی از پارامترهای فیزیکی نقش مؤثری در میزان وقوع بارندگی، تبخیر و تعرق و دما دارد و یکی از فاکتورهایی ا ست که در طول زمان کمتر د ستخوش تغییر قرارگرفته به‌عنوان عامل مهم و تأثیرگذار بر بارندگی، تبخیر و تعرق و دما در این مطالعه انتخاب‌شده است. بر اساس منابع مطالعاتی موجود تحول کارست غرب و شمال غرب ایران از بین عوامل دخیل در تحول کارست،در این تحقیق لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فا صله از آبراهه، فا صله از گ سل و کاربری ارا ضی به‌عنوان نق شه‌های عامل در نظر گرفته شدند و به‌منظور استخراج مدل پتانسیل توسعه کارست لایه‌های فوق در محیط GIS فراخوانی شدند. لایه‌های اطلاعاتی مختلف با اعمال ق ضاوت کار شنا سی (به‌ویژه با عنایت به وجود غار سهولان به‌عنوان برج سته‌ترین شاهد پالئوکارست و مبین انحلال‌پذیری سازند تشکیل‌دهنده آن) و اختصاص وزن به هر لایه در نرم‌افزار Expert Choice و بازدیدهای میدانی به صورت نق شه‌های معیار طبقه‌بندی شده و با توجه به وزن به‌د ست‌آمده نق شه پهنه‌بندی تو سعه کار ست به‌د ست‌آمده ا ست. برای تهیه مدل پتانسیل تو سعه کار ست لایه‌های اطلاعاتی فوق به نرم‌افزار ArcGIS 9.3 معرفی شدند. لا یه های اطلا عاتی فوق به‌صورت نقشه های معیار طبقه‌بندی‌شده‌اند و با توجه به درجه اهمیت هرکدام از پارامترها، رتبه‌ای از ۱ تا ۹ بر اساس روش ساعتی (ساعتی[۱]، ۱۹۸۰) به آن‌ها داده شد (جدول ۱).

۱ Saaty

جدول۱: جدول مقایسات زوجی در فرایند تحلیل سلسله مراتبی به روش ساعتی (ساعتی، ۱۹۸۰)

مقیاس	قضاوت
۱	برابر
۲	بین برابر تا متوسط
۳	متوسط
۴	بین متوسط تا زیاد
۵	زیاد
۶	بین زیاد تا خیلی زیاد
۷	خیلی زیاد
۸	بین خیلی زیاد تا فوق‌العاده زیاد
۹	فوق‌العاده زیاد

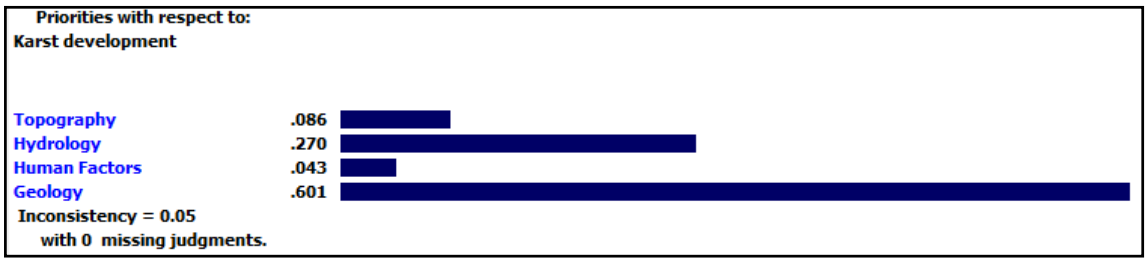
انتخاب این ارزش‌ها بر اساس مطالعات صورت گرفته، بازدیدهای صحرایی و عنایت به کلیمای گذشته و توسعه کارست دیرین منطقه و اعمال نظر کارشناسی و شناخت منطقه بوده است. پس از ارزش‌دهی به رده‌های مختلف، به هر یک از لایه‌ها بر اساس روش کارشناسی و روش AHP وزن مناسبی که مشخص‌کننده تأثیر هر عامل در درجه توسعه کارست می‌باشد، به آن‌ها داده شد. لازم به ذکر است که جمع وزن‌ها عدد ۱۰۰ در نظر گرفته شد. جدول(۲) وزن لایه‌های اطلاعاتی را نشان می‌دهد. در این مورد از نرم‌افزار Expert Choice که بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی طراحی‌شده است، جهت وزن دهی پارامترها استفاده‌شده است. بعدازآن نقشه رستری هفت پارامتر مذکور در محیط GIS تهیه و هر یک از این نقشه‌های رستری طبقه‌بندی شدند.

جدول ۲: وزن لایه‌های اطلاعاتی به روش AHP و اعمال نظر کارشناسی بر اساس وجود برجسته ترین شاهد کارستی دیرین(غار سهولان)

نام لایه	وزن نهایی
زمین‌شناسی(لیتولوژی، فاصله از گسل)	۶۰/۱
هیدرولوژی(فاصله از آبراهه)	۲۷
توپوگرافی(جهت شیب، ارتفاع، شیب)	۸/۶
عوامل انسانی یا کاربری اراضی (باغ، کشاورزی، زمین بایر، جاده، روستا)	۴/۳
جمع	۱۰۰

در ابتدا نمودار گرافیکی مدل تحلیل سلسله مراتبی در رابطه با اولویت هر یک از معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر توسعه‌یافتگی کارست در منطقه موردمطالعه ترسیم گردید. با توجه به یافته‌های تحقیق از بین معیارهای موجود در توسعه‌یافتگی کارست: به ترتیب معیارهای زمین‌شناسی، هیدرولوژی و توپوگرافی با وزن نهایی ۰/۶۰۱، ۰/۲۷۰، ۰/۰۸۶ به‌عنوان مهم‌ترین و اثرگذارترین معیار در رابطه با پتانسیل توسعه کارست در منطقه غار سهولان شناسایی گردیدند(شکل۳). نهایتاً تمام نقشه‌های رستری طبقه‌بندی شده در محیط GIS فراخوانی شدند و با دستور Raster Calculator هر پارامتر در وزن به‌دست‌آمده در نرم‌افزار Expert Choice ضرب شدند و نقشه

پهنه‌بندی توسعه کارست به دست آمد که بر اساس هدف به چهار طبقه توسعه‌یافته، طبقه توسعه متوسط، طبقه کمتر توسعه‌یافته و طبقه توسعه‌نیافته تقسیم شدند.



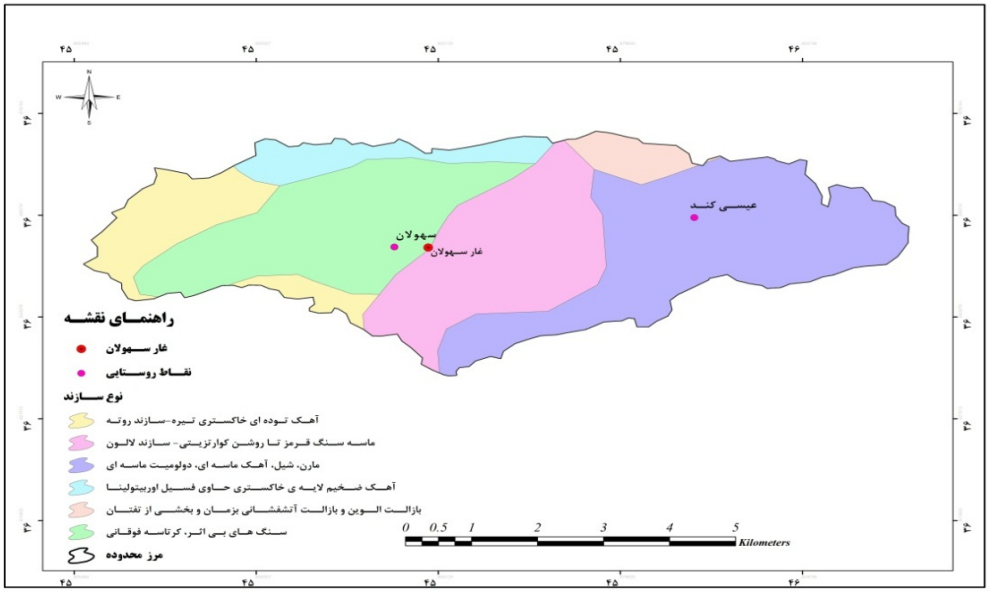
شکل۳: ضرایب حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مؤثر در توسعه‌یافتگی کارست

بحث و یافته‌ها

پارامترهای محیطی موردمطالعه مؤثر بر توسعه کارست منطقه انتخاب شد و نرخ سازگاری (که در روش تحلیل سلسله مراتبی شاخصی است که سازگاری مقایسه‌ها را نشان می‌دهد) در این پژوهش ۰/۰۵ به دست آمد. این نرخ گویای درجه صحت و دقت ارزش‌گذاری‌ها در مقایسات زوجی است. چنانچه نرخ مذکور برابر و کمتر ۰/۱ شود، می‌توان ارزش‌گذاری‌ها و مقایسات را خوب و صحیح دانست، در غیر این صورت ارزش‌گذاری و مقایسات زوجی باید دوباره انجام یا اصلاح شود. بر این اساس به بحث و بررسی پارامترهای محیطی موردمطالعه مؤثر بر توسعه کارست منطقه که شامل موارد زیر است پرداخته می‌شود:

عامل لیتولوژی

خصوصیات مختلفی از قبیل میزان رخنمون، ضخامت و خصوصیات لیتولوژیکی سنگ‌های کارستی و ارتباط با لیتولوژی های دیگر در مقیاس ناحیه‌ای، کنترل‌کننده‌های زمین‌شناسی توسعه‌ی کارست را تشکیل می‌دهند (رئیسی و کوثر، ۱۹۹۷). غار سهولان در بخشی از فلات ایران که ازنقطه‌نظر زمین‌شناسی ساختاری تحت عنوان زون خوی – مهاباد نامیده می شود، واقع گردیده است. این زون از طریق دو گسل اصلی زرینه‌رود در شرق و گسل پیرانشهر در غرب از سایر زون‌های ساختاری ایران مجزا گردیده است. علیرغم واقع شدن این زون در منتهی الیه شمال غرب زون سنندج- سیرجان، تحولات دینامیکی – ماگمایی و ساختارهای لیتولوژیکی آن با سایر زون‌های مجاور بسیار متفاوت است (درویش زاده، ۱۳۷۵). ازنظر لیتولوژیکی کوه دربرگیرنده غار سهولان از دولومیت و آهک دولومیتی به سن پرمین (سازند روته) تشکیل شده است. سنگ‌های دولومیتی کوه دربرگیرنده غار سهولان لایه‌لایه و فاقد چین‌خوردگی محسوس می‌باشد. شکل شماره (۴) گسترش سنگ‌ها و سازندهای زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد. غلبه با سنگ‌آهک و سازندهای دربرگیرنده آن است.



شکل٤: نقشه گسترش لیتولوژیکی منطقه موردمطالعه

مطالعات زمین شنا سی در مناطق کار ستی، با توجه به نقش زیاد نوع لیتولوژی در تو سعه کار ست اهمیت زیادی دارد. وجود سنگ‌های انحلال‌پذیر، که دارای ضخامت مناسبی باشند، یکی از پیش‌شرط‌های توسعه سرزمین‌های کارستی می‌باشد. وجود یک‌لایه با نفوذناپذیری کم نیز در زیر لایه نفوذپذیر باعث می‌شود که انحلال به یک لیتولوژی خاص معطوف شده و تشکیلات کارستی توسعه یابند.

در کوه قوتر واقع در ۳ کیلومتری شمال غرب غار سهولان، آهک با ضخامت بیش از ۳۰۰ متر برون‌زد دارند. در زیر آهک‌های منطقه، شیل دیده می‌شود که با توجه به تراوایی کم آن به‌خوبی در مقابل نفوذ آب به لایه‌های پایین‌تر مقاومت می‌کند (احمدی راد، ۱۳۸۳).

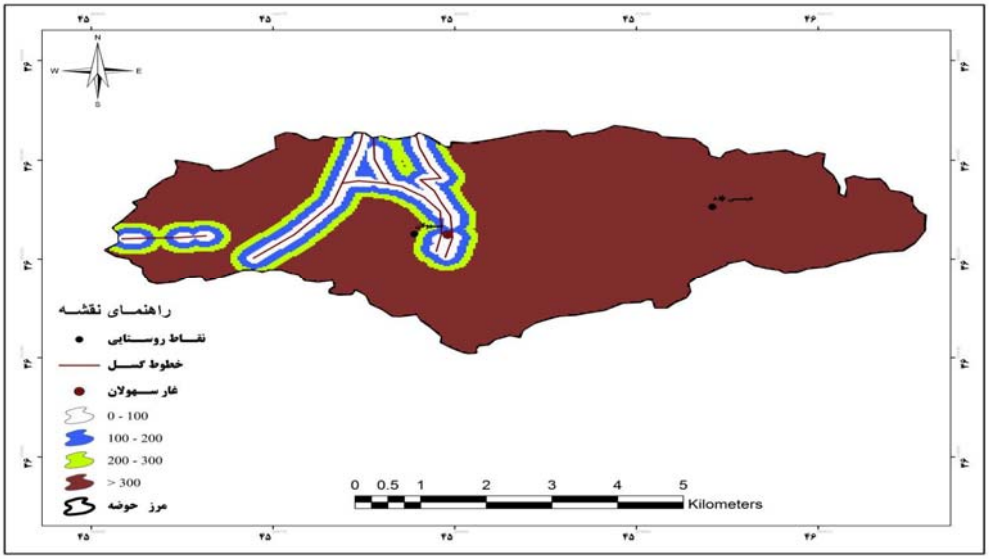
در پژوهش حا ضر واحدهای زمین شنا سی به شش طبقه د سته‌بندی شده‌اند. طبق طبقه‌بندی آهک ضخیم لایه خاک ستری حاوی ف سیل اوربیتولینا، برای پتان سیل کار ست زایی بی شترین وزن را به خود اخت صاص داده ا ست، بعدازآن به ترتیب آهک توده‌ای خاکستری تیره؛ ترکیب مارن، شیل، آهک ماسه‌ای دولومیتی؛ سنگ‌های تغییرنیافته کرتاسه فوقانی؛ ما سه سنگ قرمز تا رو شن کوارتزیتی و نهایتاً بازالت‌های اولیوینی آتشفشانی بزمان و بخشی از تفتان کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۳). بیشترین مساحت برونزد سنگ‌های منطقه متعلق به د سته(مارن، شیل، آهک و دولومیت ما سه‌ای) و کمترین مساحت مربوط به لیتولوژی بازالت‌های الیوین آتشفشانی بزمان و تفتان می‌باشد.

جدول۳: مساحت و درصد سنگ‌ها و سازندهای لیتولوژی منطقه موردمطالعه

ردیف	لیتولوژی	مساحت(Km2)	درصد
۱	مارن، شیل،آهک و دولومیت ماسه‌ای	۸/۶۱	۳۳/۱۹
۲	سنگ‌های بدون تغییر کرتاسه فوقانی	۶/۱۹	۲۳/۸۷
۳	ماسه‌سنگ قرمز تا روشن کوارتزیتی(سازند لالون)	۵/۸۸	۲۲/۶۶
۴	آهک توده ای خاکستری تیره(سازند روته)	۲/۸۷	۱۱/۰۶
۵	آهک ضخیم لایه ی خاکستری حاوی فسیل اوربیتولینا	۱/۵۲	۵/۸۵
۶	بازالت اولیوین آتشفشانی بزمان و بخشی از تفتان	۰/۸۷۴	۳/۳۷
	جمع	۲۵/۹۵	۱۰۰

عامل فاصله از گسل

علت اصلی نفوذپذیری سنگ‌های کربناته، وجود درزه‌هاست که امکان ورود آب و جریان یافتن آن را به داخل توده سنگ فراهم می‌کند. طی فرآیندهای تکتونیکی با ایجاد درزه‌ها در توده سنگی کارستی شدن در جهت‌های عمودی، افقی و یا مایل گسترش پیدا می‌کند و شکل‌گیری اشکال زیرزمینی مانند مجاری به‌هم‌پیوسته و تشکیل آبخوان‌های کارستی به سیستم درزه‌های موجود وابسته است (قبادی، ۱۳۸۸، ۴۶). شکستگی‌ها و ساختارهای تکتونیکی که اصطلاحاً خطواره نیز نامیده می‌شوند، به دلیل ایجاد فضاهایی در سازندها و واحدهای زمین‌شناسی جهت عبور آب و حرکت آن به نقاط پایین‌تر درون زمین نقاط ضعفی تلقی می‌شوند که اهمیت آن‌ها در سازندهای سخت و آهکی بیشتر است (محمودی، ۱۳۸۵). بنابراین به‌عنوان پارامتر مثبتی جهت پتانسیل توسعه کارست در نظر گرفته می‌شود. منطقه موردمطالعه دریکی از نواحی فعال تکتونیکی شمال غرب کشور واقع شده که به‌تبع آن گسل‌های زیادی با امتداد تقریبی شمالی–جنوبی به وجود آمده‌اند. وجود درزهای سنگ‌های آهکی که غار در آن تشکیل شده است، رابطه مستقیمی با گسل‌های منطقه دارد. در وزن دهی به لایه گسل، فرض اصلی بر این استوار است که میزان توسعه‌یافتگی کارست در مناطق نزدیک به گسل بیشتر است و وزن بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد و مناطق دور از خطوط گسل وزن کمتری را به خود اختصاص داده است. فاصله از گسل در چهار طبقه برای محدوده موردمطالعه تهیه گردیده است. شکل (۵) خطوط گسلی منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. که فاصله و حریم ۱۰۰ متری بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است یعنی بیشتر مستعد توسعه کارست می‌باشد و فاصله و حریم بیشتر از ۳۰۰ متر کمترین وزن را به خود اختصاص داده است، یعنی کمترین پتانسیل را در منطقه برای توسعه کارست دارد.

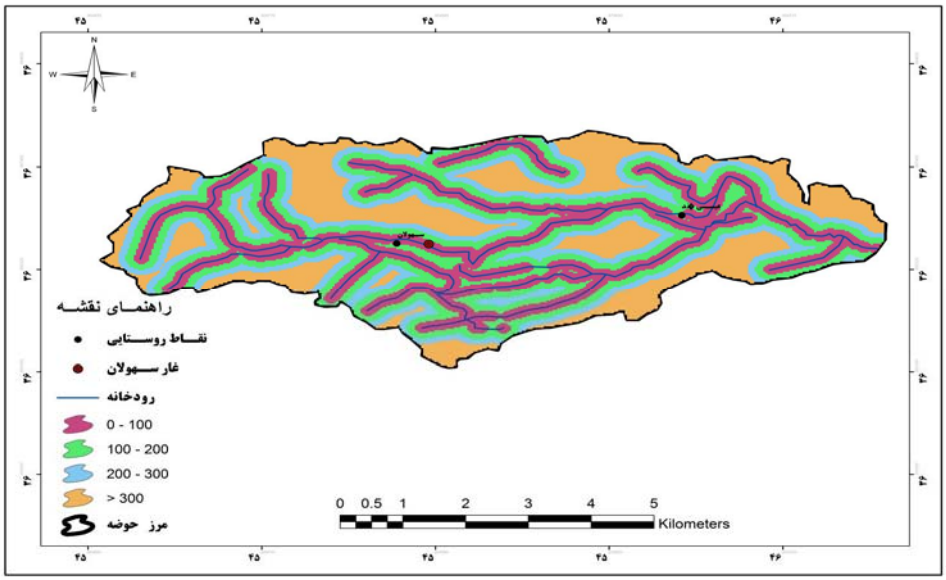


شکل۵: نقشه رستری حریم خطوط گسلی از غار در منطقه موردمطالعه (برحسب متر)

عامل فاصله از آبراهه

ارتباط بین نسبت آب نفوذی و رواناب به‌وسیله قابلیت نفوذ کنترل می‌شود و قابلیت نفوذ خود به نوع سنگ و شکستگی‌های موجود در سنگ‌های زیرسطحی بستگی دارد (سپند و همکاران، ۱۳۸۶). نوع شبکه زهکشی هر منطقه توسط لیتولوژی واحدهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و ساختارهای تکتونیکی و زمین‌شناسی منطقه کنترل

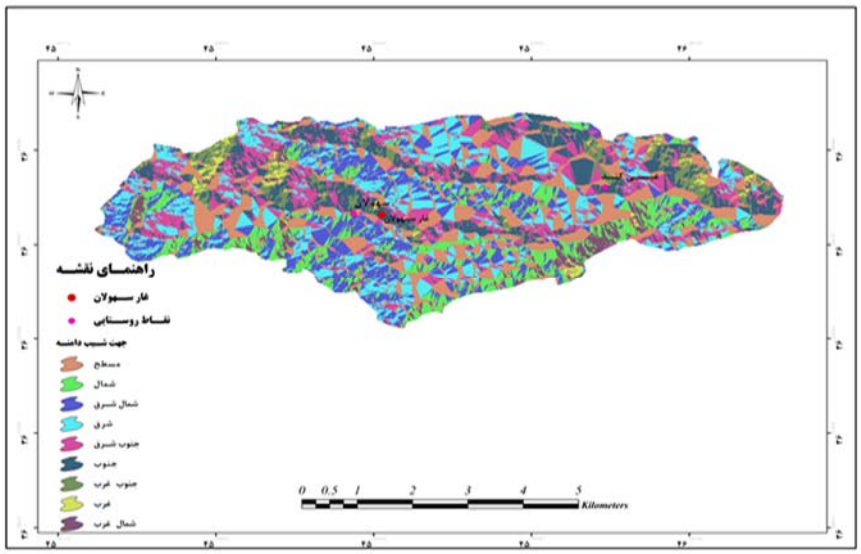
می شود. از عوامل مهم در پتانسیل کارستزایی، هیدرولوژی، تراکم آبراهه‌ها و فاصله از آن‌ها است.که هرچه میزان تراکم آبراهه بالا باشد و فاصله از آبراهه کم باشد میزان توسعه و تخریب کارست بیشتر خواهد بود. وزن دهی به این صورت می‌باشد که در مکان‌هایی که تراکم آبراهه بالا و فاصله از آبراهه کم است وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهد چون دامنه فروپاشی کارست بیشتر خواهد بود و هرقدر فاصله از آبراهه بیشتر و تراکم کمتر شود، میزان توسعه و تخریب کارست کمتر خواهد بود. شکل شماره(۶) تراکم آبراهه‌های منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. فاصله از آبراهه برای منطقه موردمطالعه به چهار دسته طبقه‌بندی‌شده که هرچه فاصله از آبراهه کمتر، وزن بیشتری به خود اختصاص داده است. فاصله از آبراهه تا ۱۰۰ متری بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است یعنی بیشتر مستعد توسعه کارست می‌باشد و فاصله بیشتر از ۳۰۰ متر کمترین وزن را به خود اختصاص داده است یعنی کمترین پتانسیل را در منطقه برای توسعه کارست دارد. دراین‌بین باید به نقش پالئوکلیمای منطقه نیز توجه داشت که معمولاً در مناطق کوهستانی مرتفع امروزی در دوره‌های یخبندان کواترنری گسترش یخچال‌ها و نیواسیون بر تخریب و تحول مناطق کارستی تأثیرگذار بوده است و برای این منطقه با توجه به ارتفاع بالا و عرض جغرافیایی آن باید مطالعات تکمیلی صورت گیرد.



شکل٦: نقشه رستری حریم خطوط آبراهه‌ای منطقه موردمطالعه (برحسب متر)

عامل جهت شیب

تأثیر جهت شیب بر روی تنوع پوشش گیاهی و بعضی فرآیندهای هیدرولوژیک مثل ذوب برف اهمیت دارد (علیزاده، ۱۳۸۹: ۵۱۳). بهترین جهت‌ها به‌منظور توسعه‌یافتگی کارست، جهت‌های پشت به آفتاب می‌باشند. با توجه به اهمیت کیفیت تابش نور خورشید در تأمین انرژی موردنیاز مناطق، جهت‌گیری دامنه‌ها نقش مهمی دراین‌ارتباط دارد. با توجه به مبانی نظری و بررسی‌های دیگر و مصاحبه با کارشناسان، شیب‌های کم و مناطق هموار بیشترین پتانسیل را در کارستی شدن دارند. مناطق با جهت‌های شمالی، شرقی و شمال شرقی بیشترین امتیاز و وزن را به خود اختصاص می‌دهند و بهترین جهت‌ها به‌منظور توسعه‌یافتگی کارست هستند. جهت‌های پشت به آفتاب به دلیل تبخیر کمتر و ماندگاری بیشتر برف به دلیل کمبود نور آفتاب زمینه مساعدتری برای توسعه کارست دارند (یمانی و همکاران،۱۳۹۲: ۵۹). در تهیه نقشه نهایی همین امر لحاظ شده است (شکل ۷).



شکل۷: نقشه رستری جهت شیب حوضه موردمطالعه

در منطقه موردمطالعه، جهت جغرافیایی شرق و شمال شرق با ۲۰/۴۵ و ۲۰/۱۴ درصد بیشترین مساحت و جهت شیب مسطح و جهت شیب غرب با مقدار ۰/۰۳ و ۳/۷ درصد کمترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. بعد به ترتیب جهت‌های جنوب شرق، شمال، جنوب، جنوب غرب و شمال غرب بعد از جهت‌های شرق و شمال شرق بالاترین درصد را دارند به ترتیب: ۱۷/۲۶، ۱۳/۵۵، ۱۳/۲۹، ۶/۲۳، ۵/۳۵ (جدول ۴).

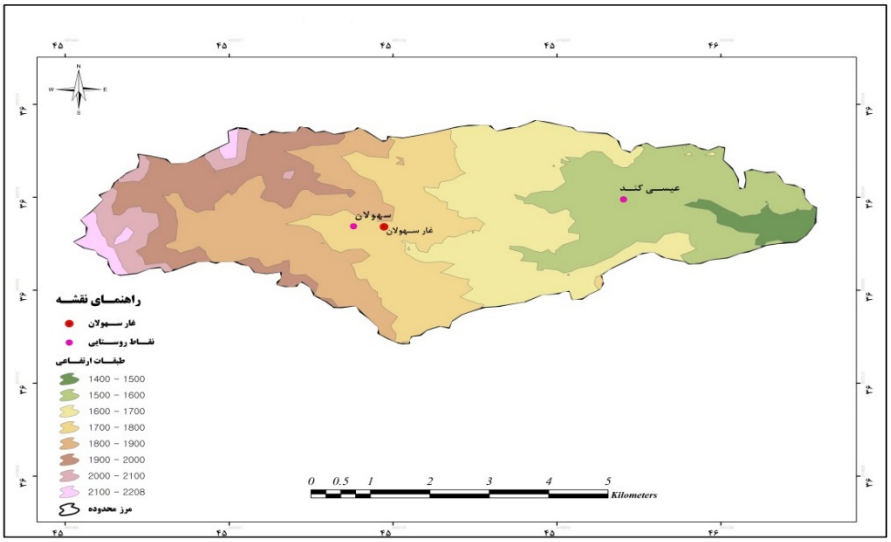
جدول٤: درصد مساحت جهات شیب منطقه موردمطالعه

ردیف	جهات شیب حوضه	مساحت هر طبقه (Km2)	درصد مساحت هر طبقه
۱	شمال	۳/۵۲	۱۳/۵۵
۲	جنوب	۳/۴۵	۱۳/۲۹
۳	شرق	۵/۳۱	۲۰/۴۵
۴	غرب	۰/۹۶	۳/۷۰
۵	شمال شرق	۵/۲۳	۲۰/۱۴
۶	شمال غرب	۱/۳۹	۵/۳۵
۷	جنوب شرق	۴/۴۸	۱۷/۲۶
۸	جنوب غرب	۱/۶۲	۶/۲۳
۹	مسطح	۰/۰۱	۰/۰۳
جمع	–	۲۵/۹۷	۱۰۰

عامل ارتفاع

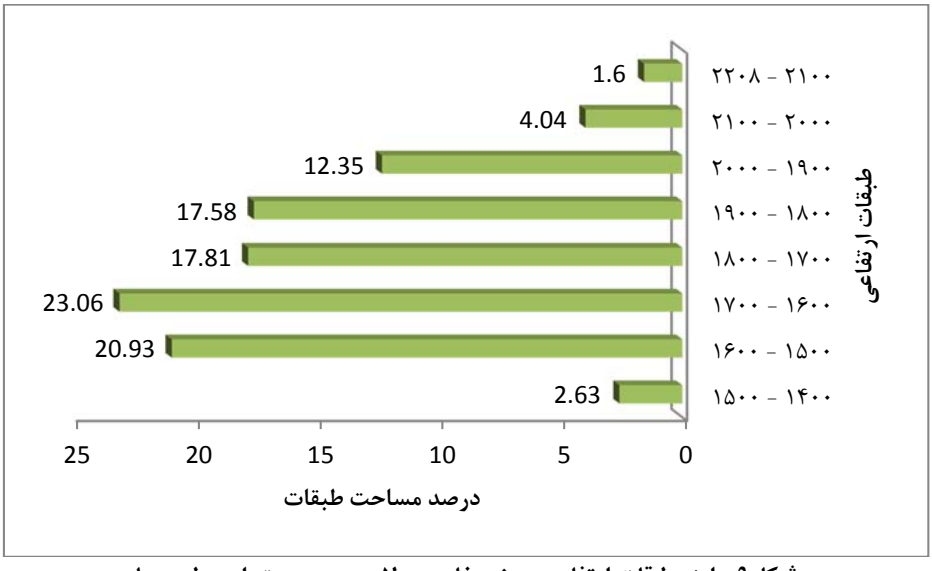
یکی از پارامترهای فیزیکی که نقش مؤثری در میزان وقوع بارندگی، تبخیر و تعرق، دما و پو شش گیاهی دارد، ارتفاع ا ست. به‌طورکلی توپوگرافی نقش مؤثری در تغذیه و تخلیه و برونزد چ شمه‌های کار ستی دارد. با افزایش ارتفاع در یک منطقه پتان سیل تو سعه کار ست به دلیل افزایش گرادیان هیدرولیکی، افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع، میزان دما کاهش و میزان بارش افزایش می‌یابد. بیشترین تحول‌یافتگی کارست در سطوح ارتفاعی بالا با

شـرط خلوص آهک مشـاهده می‌شـود. ازاین‌رو نقش زیادی در توسـعه‌یافتگی فرآیند کارسـت دارد (زروش و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۴۹). نقشـه رسـتری طبقات ارتفاعی حوضـه موردمطالعه با اسـتفاده از دسـتور Natural Breaksدر ArcGIS 9.3 به ۶ طبقه به دست آمد (شکل ۸).



شکل۸ : نقشه رستری طبقات ارتفاعی حوضه موردمطالعه (برحسب متر)

بیشترین مساحت حوضه با مقدار ۲۳/۰۶ درصد در طبقه ارتفاعی۱۷۰۰–۱۶۰۰ متر و کمترین مساحت حوضه با مقدار ۱/۶۰ درصد در طبقه ۲۲۰۸– ۲۱۰۰ متر قرار دارد. بالاترین ارتفاع حوضه ۲۲۰۸– ۲۱۰۰ می‌باشد. خود غار در ارتفاع ۱۸۰۰– ۱۷۰۰ متری قرار دارد که جزو طبقه با ارتفاع متوسط می‌باشد (شکل ۹).

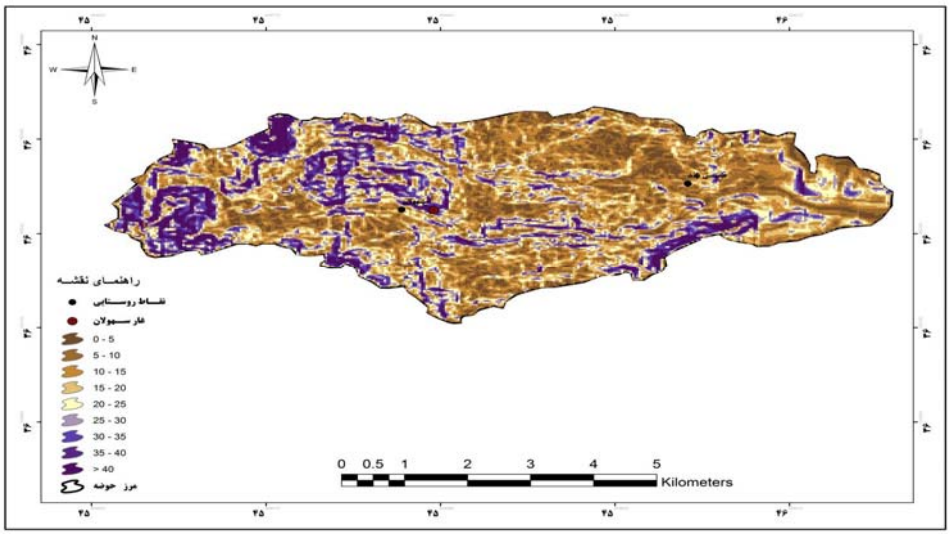


شکل۹: دامنه طبقات ارتفاعی حوضه غار سهولان برحسب متر از سطح دریا

عامل شیب

از دیگر فاکتورهای توپوگرافی مؤثر که گرادیان هیدرولیکی و جهت حرکت آب زیرزمینی را تعیین می‌کند، شیب توپوگرافی یا شیب سطح زمین می‌باشد. میزان شیب هم در میزان رواناب حاصل از بارش و هم در میزان نفوذ آب به داخل زمین و عمل انحلال توسط بارش نقش مؤثری ایفا می‌کند (زروش و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۵۰).

برای تهیه این لایه ابتدا مدل رقومی ارتفاعی منطقه از روی نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ تهیه سپس لایه شیب استخراج شد و به شیب کمتر امتیاز بیشتری اختصاص داده شد. نقشه نهایی شیب منطقه موردمطالعه در ۹ طبقه از کلاس ۵ درصد تا بیشتر از ۴۰ درصد بر اساس دستور نچرال بریک در ArcGIS 9.3 به دست آمد (شکل ۱۰).



شکل۱۰: نقشه رستری شیب منطقه موردمطالعه برحسب درصد

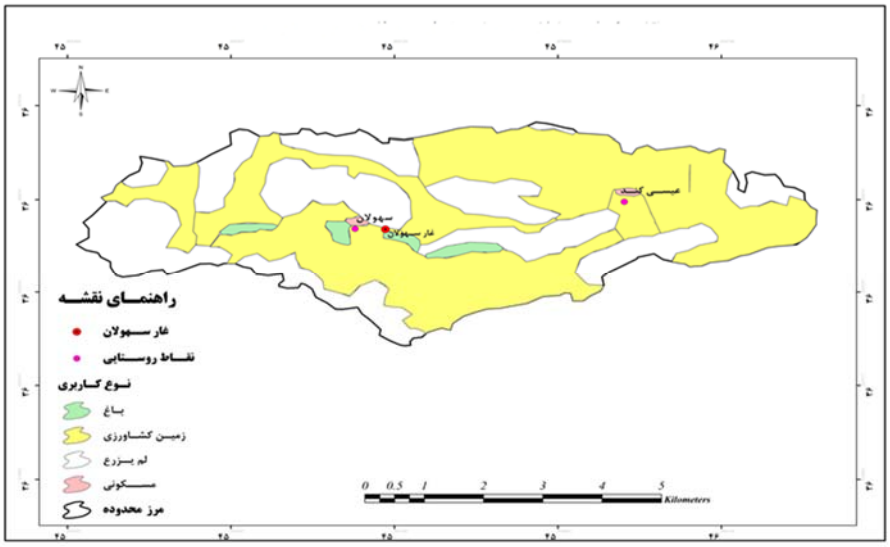
شیب توپوگرافی یک عامل مهم کنترل‌کننده سیستم جریان آب زیرزمینی است. با توجه به مبانی نظری، شیب‌های کم و مناطق مسطح بیشترین پتانسیل را در کارستی شدن دارند. در حوضه موردمطالعه شیب ۲۰- ۰ در قلمرو شیب کم می‌باشند. گسترش پدیده کارست در شیب‌های کم به دلیل تماس بیشتر آب با آهک بیشتر بوده و پدیده انحلال در این شیب‌ها تشدید می‌شود. جدول شماره (۵) مساحت طبقات شیب منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. در وزن دهی در نرم‌افزار اکسپرت چویس (با توجه به این که در شیب‌های کم، فرصت نفوذ بیشتر است)، ارزش بیشتری داده شد.

جدول۵: درصد مساحت طبقات شیب منطقه موردمطالعه

ردیف	طبقات شیب (درصد)	مساحت هر طبقه (Km2)	درصد مساحت هر طبقه	درصد مساحت تراکمی
۱	۰-۵	۱/۸۶	۷/۱۶	۷/۱۶
۲	۵ -۱۰	۴/۶۳	۱۷/۸۵	۲۵/۰۱
۳	۱۰ -۱۵	۵/۱	۱۹/۶۵	۴۴/۶۶
۴	۱۵ -۲۰	۴/۱۷	۱۶/۰۶	۶۰/۷۲
۵	۲۰ -۲۵	۳/۰۶	۱۱/۸۰	۷۲/۵۲
۶	۲۵ -۳۰	۲/۳	۸/۸۶	۸۱/۳۸
۷	۳۰ -۳۵	۱/۶۸	۶/۴۷	۸۷/۸۵
۸	۳۵ -۴۰	۱/۱۴	۴/۴۰	۹۲/۲۵
۹	> ۴۰	۲/۰۱	۷/۷۵	۱۰۰
جمع	-	۲۵/۹۵	۱۰۰	۱۰۰

عامل کاربری اراضی

برای بررسی میزان قابلیت پوشش زمین و کاربری اراضی جهت پتانسیل کارست زایی در محدوده موردنظر، از نقشه کاربری اراضی استفاده‌شده است. نقشه کاربری اراضی منطقه موردمطالعه از روی نقشه توپوگرافی۱:۵۰۰۰۰ استخراج شد. که به چهار طبقه باغ و تاکستان، کشاورزی، زمین بایر، راه و مناطق مسکونی تقسیم‌شده‌اند (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: نقشه کاربری اراضی منطقه موردمطالعه

جدول شماره(۶) مساحت کاربری اراضی منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. به ترتیب با توجه به میزان تأثیر آن‌ها در کارست زایی منطقه موردمطالعه، بیشترین وزن به باغ و تاکستان داده شد، بعد کشاورزی، زمین بایر و نهایتاً راه و مناطق مسکونی کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به محدود بودن منطقه موردمطالعه علاوه بر نقشه‌های توپوگرافی مشاهدات میدانی نیز در استخراج کاربری‌ها دخالت داده‌شده است.

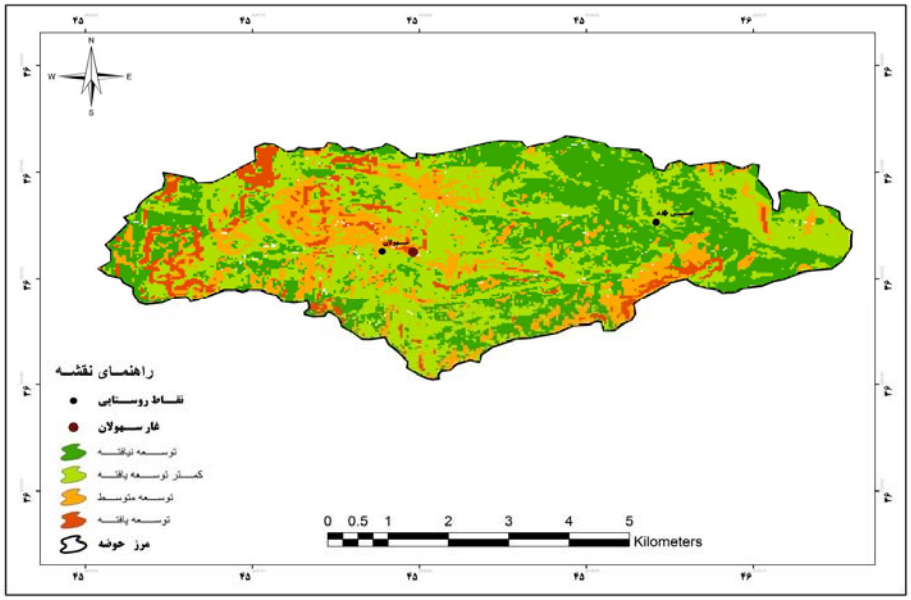
جدول ٦: مساحت کاربری اراضی منطقه موردمطالعه

کاربری اراضی	مساحت هرطبقه (Km2)	درصد مساحت هر طبقه
تاکستان و باغ میوه	۰/۵۰۸۲۴۵	۱/۹۵
مسکونی	۰/۰۷۹۱۳۸	۰/۳۰
لم یزرع	۱۰/۰۴۲۹۵	۳۸/۶۰
زمین کشاورزی	۱۵/۵۱۷۸۱	۵۹/۱۵
جمع	۲۶/۱۴	۱۰۰

نقشه نهایی پهنه‌بندی توسعه کارست با روش تحلیل سلسله مراتبی

نقشه نهایی پهنه‌بندی حوضه کارستی غار سهولان با استفاده از لایه‌های رستری زمین‌شناسی، گسل، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع و هیدرولوژی با ترکیب وزن‌های به‌دست‌آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی با هر لایه و همپوشانی آن‌ها در محیط GIS به دست آمد. بر اساس اصول مبانی کارست و مشاهدات میدانی، نقشه نهایی حاصل از پهنه‌بندی به چهار طبقه: توسعه‌نیافته، کمتر توسعه‌یافته، توسعه متوسط و توسعه‌یافته طبقه‌بندی شد. شکل شماره (۱۲) نقشه نهایی پهنه‌بندی توسعه کارست و جدول شماره(۷) مساحت و درصد

طبقات توسعه کارست به روش تحلیل سلسله مراتبی را نشان می‌دهد. از کل مساحت منطقه، ۴۲/۸۸ درصد در طبقه کمتر توسعه‌یافته، ۳۳/۳۷ در صد در طبقه توسعه‌نیافته، ۱۶/۹۲در صد در طبقه متوسط و ۶/۸۳ در صد در طبقه توسعه‌یافته قرارگرفته است. عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰/۶۶۷ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده پتانسیل توسعه کارست و عامل کاربری اراضی با ارزش۰/۰۴۳ کمترین وزن را به خود اختصاص داده است که کمترین تأثیر را در کارست زایی حوضه به خود اختصاص داده است.



شکل۱۲: نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست حوضه موردمطالعه

جدول ۷: مساحت و درصد طبقات توسعه کارست به روش AHP

ردیف	طبقه	مساحت(Km2)	درصد مساحت طبقات
۱	توسعه‌نیافته	۸/۵۴۴۶۰۳	۳۳/۳۷
۲	کمتر توسعه‌یافته	۱۰/۹۷۷۸۶	۴۲/۸۸
۳	توسعه متوسط	۴/۳۳۲۹۱۴	۱۶/۹۲
۴	توسعه‌یافته	۱/۷۴۳۴۹۳	۶/۸۳
۵	جمع	۲۵/۵۹۸۸۷	۱۰۰

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش شناسایی و پهنه‌بندی پتانسیل توسعه کارست در محدوده غار سهولان در شمال غرب ایران در استان آذربایجان غربی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. بر اساس اصول مبانی کارست و مشاهدات میدانی و یافته‌های دیگر، هفت پارامتر به‌عنوان عوامل مؤثر بر توسعه کارست در منطقه در نظر گرفته شد که نتایج حاصل به‌صورت نقشه‌ای با چهار کلاس توسعه کارست: کارست توسعه‌نیافته، کمتر توسعه‌یافته، توسعه متوسط و توسعه‌یافته استخراج گردید. از کل مساحت منطقه ۴۲/۸۸ در صد در طبقه کمتر توسعه‌یافته،۳۳/۳۷ درصد در طبقه توسعه‌نیافته، ۱۶/۹۲ درصد در طبقه متوسط و۶/۸۳ درصد در طبقه توسعه‌یافته قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، غار سهولان در طبقه توسعه متوسط تا توسعه‌یافته ازنظر کارست زایی واقع شده است و این مسئله بر صحت سنجش توسعه‌یافتگی کارست در این بخش دلالت دارد(شکل۱۳).

البته با توجه به نقش پالئوکلیمای منطقه و متفاوت بودن بسیاری از عناصر آب و هوایی در گذشته و مقایسه با زمان حال و شناسایی سینک هولهای کنونی منطقه قاعدتاً تفاوت کارستزایی جزئی در گذشته و حال منطقه موردی منطقی به نظر می‌رسد. جهت کنترل صحتو سقم مدل به غار سهولان به‌عنوان برجسته ترین عارضه کارستی موجود و شاهدی بر کارسیفیکاسیون توجه ویژه شده است.

شکل۱۳: اشکال کارستی داخل غار سهولان

در بررسی عوامل هفتگانه: به لحاظ لیتولوژی غار در سازند لالون با ترکیب ماسه‌سنگ قرمز تا روشن کوارتزیتی و سنگ‌های بدون تغییر آهکی کرتاسه فوقانی قرارگرفته است، که به ترتیب، ۲۲/۶۶ و ۲۳/۸۷ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. به لحاظ فاصله ازگسل: غار در بافر ۱۰۰– ۰ متر از گسل واقع‌شده است. به لحاظ فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه‌ای نیز غار در بافر ۱۰۰– ۰ متری آبراهه واقع است. فاصله کمتر با آبراهه و تراکم بیشتر آبراهه‌ای توسعه بیشتر کارست را نشان می‌دهد. به لحاظ جهت شیب نیز غار در جهت جنوب واقع شده که ۱۳/۲۹ درصد مساحت حوضه دارای جهت جنوبی می‌باشد. به لحاظ طبقات ارتفاعی: غار در طبقه ۱۸۰۰– ۱۷۰۰ متری واقع شده است. به لحاظ شیب: غار در شیب بیشتر از ۴۰ درصد واقع شده است که هرچه شیب کمتر باشد توسعه کارست بیشتر خواهد بود. در کل عامل لیتولوژی منطقه با ارزش ۰/۶۶۷ بیشترین وزن و مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده پتانسیل توسعه کارست و عامل کاربری اراضی با ارزش ۰/۰۴۳ کمترین وزن را به خود اختصاص داده است که کمترین تأثیر را در کارست زایی حوضه به خود اختصاص داده است.

منابع

- احمدی راد، صلاح‌الدین، ۱۳۸۳، مطالعه غار آبی سهولان با نگرشی ویژه بر هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، تبریز، ایران.
- بهرامی، شهرام، زنگنه اسدی، محمدعلی، جهانفر، علی، ۱۳۹۵، ارزیابی توسعه‌ی کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در زاگرس (منطقه موردمطالعه: تاقدیس قلاجه و توده پراو بیستون)، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۴۴، صص ۱۲۲–۱۰۷.
- خانلری، غلامرضا، مؤمنی، علی‌اکبر، ۱۳۹۱، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعه فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین، غرب ایران، مجله جغرافیا و آمایش شهری– منطقه‌ای، شماره۳، صص ۶۱– ۷۴.
- درویش زاده، علی، ۱۳۷۵، زمین‌شناسی ایران، نشر دانش امروز.

- زروش، ناهید، واعظی، عبدالرضا، کریمی، حاجی، ۱۳۹۳، ارزیابی پتانسیل توسعه کارست در تاقدیس کبیر کوه استان ایلام با استفاده از تلفیق فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (*AHP*) و سنجش‌ازدور و *GIS*، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال۳، شماره۳، صص ۱۵۷– ۱۴۴.
- سپند، ساحل، چیت‌سازان، منوچهر، رنگزن، کاظم، میرزایی، یحیی،۱۳۸۶، تلفیق سنجش‌ازدور و *GIS* در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی محدوده لالی، همایش ژئوماتیک تهران.
- علیزاده، امین، ۱۳۸۹، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ سی‌ام، مشهد، ایران.
- قبادی، محمدحسین، ۱۳۸۸، زمین‌شناسی مهندسی کارست، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
- قبادی، محمدحسین، بهزادتبار، پریا، ۱۳۹۵، ارزیابی توسعه کارست بر اساس ویژگی‌های لیتولوژیکی، مورفولوژیکی و ساختاری در منطقه بید سرخ، شرق صحنه، شرق استان کرمانشاه، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، سال ۱۰، شماره ۲۰، صص ۹۱–۷۶.
- قره خوانی، مریم، واعظی، عبدالرضا، بهرامیان، ابراهیم، ۱۳۹۲، بررسی توسعه کارست و غارهای کارستی در استان آذربایجان شرقی، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، مشهد، ایران.
- محمودی، فرج‌الله، ۱۳۸۵، ژئومورفولوژی ساختمانی، چاپ هشتم، انتشارات پیام نور.
- ملکی، امجد، شاهوانی، داود و علایی طالقانی، محمود، ۱۳۸۹، پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه، فصل‌نامه مدرس علوم انسانی، دور ۱۳ شماره ۱، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- مرادی، صمد، رضایی، محسن، پرهمت، جهانگیر، ۱۳۸۹، بررسی تأثیر عوامل مختلف در توسعه کارست پهنه‌های کارستی زاگرس، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، بهمن ۱۳۸۹، تهران، ایران.
- یمانی، مجتبی، شمسی‌پور، علی‌اکبر،جعفری اقدم، مریم، باقری سید لشکری، سجاد،۱۳۹۲، بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و *AHP* ، استان کرمانشاه، مجله علوم زمین، سال۲۲، شماره ۸۸، صص ۶۶–۵۷.

- *Calic, J., 2011, Karstic uvula revisited: Toward a redefinition of the term, Geomorphology, Vol.134, No.1, pp.32-42.*
- *Ford, D.C., Williams, P.W., 1989, Karst geomorphology and hydrology,. London: Unwin Hyman, Vol. 601.*
- *Hung, L. Q., Dimr, N.Q., Tam, V.T., Lagrou, D., 2002, Remote sensing & GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi Catchment (Son La- NW Vietnam). Journal of cave & Karst Studies, Vol. 64, No.1, pp. 23-33.*
- *Maghsoudi, M., Ganjaeian, H. and Amani, K., 2016. Evaluation of the Contributing Factors in Development and Zoning Karst in Palangan Zone by Using Fuzzy Logic and ANP. Open Journal of Geology, Vol. 6, No. 06, pp.468.*
- *Palmer, A. N., 2007, Cave Geology: Dayton, Ohio, Cave Books, p. 454.*
- *Raeisi, E., Kowsar, N., 1997, Development of Shahpour Cave, southern Iran. Cave and Karst Science,Vol. 24, No. 1, pp. 27–34.*
- *Saaty, T.L., 1980, The Analytic Hierarchy Process, Mcgraw _ Hill, Inc., Reprinted By RWS Publications, Pittsburgh.*
- *Stafford, K.W., Brown, W.A., Ehrhart, J.T., Majzoub, A.F. and Woodard, J.D., 2017. Evaporite karst geohazards in the Delaware Basin, Texas: review of traditional karst studies coupled with geophysical and remote sensing characterization. International Journal of Speleology, Vol. 46, No.2, p.169.*
- *White, B. W., 1988, Geomorphology and hydrology of karst terrains, Oxford University Press. p. 464.*

- *Waele, J., Plan, L. Audra, Ph., 2009, recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. Geomorphology, Vol. 106, No. 1, pp. 1–8.*
- *Waele, J., Gutierrez, F., Audra, P., 2015, Karst geomorphology: from hydrological functioning to palaeoenvironmental reconstructions. Geomorphology, Vol. 229, pp. 1-2.*
- *Tirla, L., Vijulie, I., 2013, Structural–tectonic controls and geomorphology of the karst corridors in alpine limestone ridges: Southern Carpathians, Romania. Geomorphology Journal, Vol.197, pp. 123–136.*
- *Zeng, S., Jiang, Y. and Liu, Z., 2016. Assessment of climate impacts on the karst-related carbon sink in SW China using MPD and GIS. Global and Planetary Change, Vol. 144, pp.171-181.*