

به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی پتانسیل گسترش کارست‌سنگ‌های کربناتی زاگرس بر پایه عامل‌های آب‌زمین‌شناختی و اقلیمی

بابک ابراهیمی^۱ و عبدالله سیف^{۲*}

^۱دکتر، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، اصفهان، ایران
^۲دانشیار، گروه جغرافیایی طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۹

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی پتانسیل گسترش کارست در کربنات‌های رخنمون شده ناحیه زاگرس انجام شده است. در این پژوهش گسترش کارستی شدن واحدهای آهکی منطقه زاگرس با توجه به نقش عوامل مؤثر در توسعه کارست، ارزیابی شده است. مهم‌ترین عامل‌های در نظر گرفته شده، عامل‌هایی است که White (1988) آنها را در قالب ۳ نیروی پیشبرنده فیزیکی، شیمیایی و وضعیت آب‌زمین‌شناختی معرفی کرده است. این عامل‌ها عبارتند از: بارش، دما، برجستگی توپوگرافیک، سنگ‌شناسی، ستبرای چینه‌ای واحد انحلال‌پذیر و وضعیت زمین‌ساختی. در این پژوهش هوازدگی شیمیایی در دوره‌های یخبچالی و عهد حاضر طبق نمودارهای پلتیر به عنوان جایگزین اثر بارش و دما به کار رفته است. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مختلف، رده‌بندی، امتیازبندی و وزن‌دهی آنها در یک سامانه اطلاعات جغرافیایی صورت گرفته است. شاخص گسترش کارست (K_1) بر پایه تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به دست آمده و پس از رده‌بندی آن نقشه تئوریک کارست تهیه شده است. بر پایه روش تلفیق، مقدار این شاخص میان صفر تا ۴۰۰ متغیر خواهد بود. طبق نقشه تئوریک گسترش کارست از مجموع 109313 Km^2 واحدهای کربناتی در منطقه مطالعاتی (۲۵ درصد کل محدوده مطالعاتی)، 34212 Km^2 (۳۱/۳ درصد) واحدهای کربناتی) در رده خیلی کم تا کم گسترش کارست قرار می‌گیرد. همچنین 61272 Km^2 (۵۶ درصد واحدهای کربناتی) در رده متوسط گسترش کارست و 13829 Km^2 (۱۲/۷ درصد واحدهای کربناتی) در رده خیلی زیاد تا زیاد گسترش کارست قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، ۶۸/۷ درصد از رخنمون‌های کربناتی در سطح منطقه مطالعاتی دارای پتانسیل گسترش کارست در رده متوسط به بالا هستند. ارزیابی صحت رده‌بندی صورت گرفته بر پایه تراکم چشمه‌های کارستی و غارهای موجود صورت گرفته است. به این منظور بانک اطلاعات چشمه‌های کارستی و غارهای منطقه تهیه شد. مشخص شد که در مجموع ۶۴ غار و ۱۲۹ چشمه کارستی (با دبی بیش از ۱۰ لیتر بر ثانیه) در رده خیلی کم تا کم گسترش کارست قرار می‌گیرد. همچنین ۱۳۲ غار و ۳۰۰ چشمه در رده متوسط و ۵۱ غار و ۱۶۲ چشمه در رده زیاد تا خیلی زیاد گسترش کارست قرار می‌گیرند. تراکم غارها به ترتیب برای رده‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد برابر با $0/0014$ ، $0/0020$ ، $0/0022$ ، $0/0036$ ، $0/0039$ غار بر کیلومتر مربع است. تراکم چشمه‌ها با دبی بیش از ۱۰ لیتر بر ثانیه نیز به ترتیب برای رده‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد گسترش کارست برابر با $0/0035$ ، $0/0039$ ، $0/0049$ ، $0/0111$ و $0/0131$ چشمه بر کیلومتر مربع است. به عبارت دیگر تراکم چشمه‌ها و غارها با درجه گسترش واحدهای کربناتی منطقه زاگرس تطابق خوبی دارد.

کلیدواژه‌ها: وضعیت آب‌زمین‌شناختی، نیروهای پیشبرنده فیزیکی و شیمیایی، شاخص گسترش کارست، غار، کارست، زاگرس.

*نویسنده مسئول: عبدالله سیف

E-mail: abdsafe@yahoo.com

۱- پیش‌نویس

در ایران نیز مانند بسیاری از کشورهای در حال رشد خاورمیانه، منابع آب آبرفتی پاسخگوی نیاز رو به رشد آب نیست و از این رو در دهه‌های اخیر توجه ویژه‌ای به منابع آب کارستی شده است. در دسترس بودن منابع آب کارستی در مناطق مختلف رابطه مستقیم با گسترش فرایند کارستی شدن دارد و بنابراین لزوم ارزیابی پتانسیل گسترش کارست در نواحی با شرایط آب‌وهوایی و آب‌زمین‌شناختی متفاوت احساس می‌شود.

تقریباً ۲۰ درصد از سطح خشکی‌های زمین (صرف نظر از مناطق پوشیده از یخ) توسط رخنمون‌های کارستی کربناتی و تبخیری پوشیده شده است (Ford & Williams, 2007). برآورد شده است که ۱۰ تا ۱۵ درصد از رخنمون‌های کارستی از واحدهای کربناتی تشکیل شده باشند (Ford & Williams, 2007: Palmer, 2007). از آنجا که برخی از این رخنمون‌ها از واحدهای کربناتی (یا تبخیری) ناخالص تشکیل شده‌اند لندفروم‌های خاص کارستی یا منابع مهم آبی در آنها گسترش نیافته است.

ارزیابی گسترش واحدهای کارست کربناتی در ایران به سال ۱۹۹۷ مربوط می‌شود (Raeisi & Kowsar, 1997). ارزیابی مشابهی نیز در سال ۱۹۹۸ صورت گرفته است (Dumas, 1998). شکل ۱ رخنمون واحدهای کربناتی کارستی را بر پایه نظر این پژوهشگران نشان می‌دهد. به باور

پتانسیل کارستی شدن بیانگر پتانسیل گسترش و رشد کارست در واحدهای کربناتی بر پایه برخی مؤلفه‌های بنیادین و مؤثر در گسترش کارست است. به عبارت دقیق‌تر پتانسیل کارستی شدن بیانگر میزان انتظار ما از گسترش کارست بر پایه ضوابط در نظر گرفته شده است و می‌تواند نسبت به گسترش واقعی کارست انحراف

منطقه کارستی دارند. بر این اساس موقعیت و تراکم گسل‌های کوچک و بزرگ می‌تواند پایه خوبی برای تهیه لایه شاخص وضعیت زمین‌ساختی باشد. ستبرای لایه‌های انحلال‌پذیر عامل مهم دیگری در کنترل گسترش کارست است. عموماً گسترش کارست در سنگ‌های انحلال‌پذیری که با ستبرای کم میان لایه‌های غیر قابل نفوذ قرار گرفته‌اند کمتر از سنگ‌های انحلال‌پذیر با ستبرای چینه‌ای بالاست (White, 1988). بارش و دما (متغیرهای آب‌وهوایی) عناصر اصلی مؤثر در گسترش کارست و پدیده انحلال هستند. بارش تأمین‌کننده آب مورد نیاز فعالیت‌های شیمیایی و دما تعیین‌کننده سرعت این واکنش‌هاست. تخریب شیمیایی شامل انحلال، اکسایش و آب‌گیری (Hydration) کانی‌های مختلف سازنده سنگ از دید تئوری ارتباط مستقیمی با شرایط آب‌وهوایی دارد. Peltier (1950) ارتباط میان فرایندهای مختلف از جمله هوازگی شیمیایی را با متغیرهای مهم آب‌وهوایی ارائه کرد. وی نمودارهایی ارائه کرد که بر پایه آنها می‌توان وضعیت هوازگی شیمیایی، عملکرد یخبندان، فرسایش بارانی، حرکات توده‌ای، اثر باد و مناطق مورفونیک را با توجه به مقادیر بارش و دما به صورت کیفی ارزیابی کرد. در این مطالعه نیز درجه هوازگی شیمیایی (به عنوان شاخص درجه انحلال) در دوره‌های یخچالی و میان‌یخچالی بر پایه نمودارهای Peltier (1950) ارزیابی و به عنوان لایه شاخص بارش و دما به کار گرفته شده است. شکل ۳ نمودارهای یادشده را برای هوازگی و پهنه‌های مورفونیک نشان می‌دهد (Peltier, 1950).

۲-۲. مدل سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و شاخص گسترش کارست

در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه برقراری ارتباط میان مدل‌های اطلاعات جغرافیایی و دیگر مدل‌های پژوهشی رخ داده است. هدف پایانی بیشتر این پژوهش‌ها، ترکیب داده‌های زمین‌منا از منابع مختلف به منظور بررسی و تجزیه اندرکنش‌ها و فراهم‌سازی برخی پیش‌بینی‌هاست. در بیشتر این پژوهش‌ها، مدل سامانه اطلاعات جغرافیایی به فرایندی که در آن مجموعه‌ای از نقشه‌های ورودی بر اثر عملکرد یک عملگر ریاضی به یک نقشه خروجی تبدیل می‌شود، گفته می‌شود (Bonham-Carter, 1994). در این مدل‌های عملگرهای ریاضی می‌توانند فرم‌های زیادی داشته باشند ولی به هر صورت این توابع بر پایه یک فهم تئوریک و یا یک سری اصول فیزیکی و یا شیمیایی از موضوع تدوین می‌شوند. بر این اساس ۳ نوع مدل سامانه اطلاعات جغرافیایی قابل تعریف است (Bonham-Carter, 1994):
 ۱) مدل‌های تئوریک؛ ۲) مدل‌های نیمه‌تجربی؛ ۳) مدل‌های تجربی. در برخی پدیده‌ها، قوانین فیزیکی و شیمیایی حاکم به اندازه‌ای پیچیده رفتار می‌کنند که بیان آنها در قالب روابط ریاضی امکان‌پذیر نیست. در چنین شرایطی پیش‌بینی وضعیت پدیده بر پایه یک سری روابط و مشاهدات تجربی صورت می‌گیرد. در مدل‌سازی‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل‌ها و روابط تجربی نقش مهمی در انتخاب نوع عملگر و نیز وزن‌های اختصاص یافته به لایه‌های ورودی مدل دارند. وزن‌دهی لایه‌ها می‌تواند بر پایه ضوابط آماری و مشاهدات مستقیم منطقه‌ای (داده‌محور) یا نظرات کارشناسی (دانش‌محور) صورت پذیرد. تلفیق داده‌های وزن داده شده به روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد. یکی از این روش‌ها با نام شاخص همپوشانی (Index overlay) روشی معمولی است که در بسیاری از پژوهش‌ها مشابه به کار گرفته می‌شود. در این روش بر پایه تجربه به هر یک از متغیرها وزن خاصی داده می‌شود که بیانگر نقش نسبی آن متغیر در شکل‌گیری پدیده است.

در این پژوهش یک مدل سامانه اطلاعات جغرافیایی تجربی (مدل دانش محور به روش شاخص همپوشانی) برای وزن‌دهی و تلفیق داده‌ها و در پایان ارزیابی درجه گسترش کارست به کار رفته است. ارزیابی درجه گسترش کارست بر پایه تعریف شاخصی به نام شاخص گسترش کارست (Ki) بر پایه مدل مفهومی White (1988) صورت گرفته است. در این مدل مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در گسترش کارست در نظر گرفته شده است. البته در این مدل به برخی عوامل دیگر که می‌تواند در

داشته باشد (به‌ویژه زمانی که گسترش کارست به دلایلی مستقل از عامل‌های در نظر گرفته شده باشد). در این پژوهش با تمرکز بر پتانسیل کارستی شدن سنگ‌های کربناتی در ناحیه زاگرس، تلاش می‌شود تا نقش عامل‌های مهم یاد شده در میزان پتانسیل کارستی شدن واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی جنوب باختر ایران لحاظ شود. مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در گسترش کارست کربناتی که در این پژوهش لحاظ شده‌اند عبارتند از سنگ‌شناسی، وضعیت زمین‌ساختی (به‌طور خاص تراکم گسل‌های اصلی و فرعی)، برجستگی توپوگرافیک، ستبرای سنگ‌های کربناتی و شرایط گذشته و حال آب‌وهوایی. به این منظور، پتانسیل کارستی شدن واحدهای کربناتی با معرفی شاخصی با عنوان شاخص گسترش کارست (Karst Index) انجام گرفته است. این شاخص بر پایه لایه‌های تهیه شده مربوط به عوامل مؤثر در گسترش کارست و در قالب سامانه اطلاعات جغرافیایی محاسبه شده است. در پایان بر پایه این شاخص نقشه تئوریک پتانسیل گسترش کارست منطقه زاگرس تهیه و نتایج با لندفرم‌های مهم کارستی (چشمه‌های کارستی و غارها) مقایسه شده است.

۲-۲-۱. روش‌شناسی و داده‌ها

۲-۱. مدل تفهیمی گسترش کارست

در این پژوهش مدل تفهیمی گسترش کارست به عنوان چارچوبی برای گسترش الگوریتم محاسبه شاخص گسترش کارست منطقه زاگرس به کار گرفته شده است. بر پایه این مدل، لندفرم‌های کارست کربناتی نتیجه عملکرد سه نیروی پیشبرنده (Driving forces) هستند. White (1988) توضیح داد که سنگ‌ها و فرایندها طی یک روش سیستماتیک به صورت ۷ عامل مجزا و در قالب ۳ نیروی پیشبرنده مؤثر در فرایند کارستی شدن قابل بررسی هستند (شکل ۲). بر پایه نظر وی، این ۳ نیروی پیشبرنده عبارتند از الف) وضعیت آب‌زمین‌شناختی؛ ب) نیروی پیشبرنده شیمیایی؛ ج) نیروی پیشبرنده مؤثر در فرایند کارستی شده فیزیکی. درجه گسترش کارست در پایان نتیجه توزان و تعامل میان این ۳ نیروی پیشبرنده است.

به باور White (1988) ستبرای لایه انحلال‌پذیر، ویژگی چینه‌شناسی (و سنگ‌شناسی) و وضعیت زمین‌ساختی ۳ متغیر اصلی در قالب وضعیت آب‌زمین‌شناختی است. همچنین متغیرهای بارش، دی‌اکسید کربن در دسترس و دما به عنوان متغیرهای مهم نیروی پیشبرنده شیمیایی در نظر گرفته شده‌اند. این ۳ متغیر بیشتر با عنوان متغیرهای آب‌وهوایی نیز معرفی می‌شوند. White (1988) بر این باور است که منبعی برای تأمین انرژی مورد نیاز کارست لازم است. بر پایه نظر وی بارش و عملکرد نیروی نقل، نیروی لازم را برای حرکت آب از درون توده سنگ از نواحی مرتفع‌تر به سوی سطح اساس فرسایش تأمین می‌کند. بنابراین شیب هیدرولیکی، نیروی فیزیکی اولیه برای حرکت آب در توده سنگی را فراهم می‌سازد که شاخص آن برجستگی توپوگرافیک است. در حقیقت، برجستگی توپوگرافیک انرژی لازم برای گردش آب زیرزمینی را در نواحی کارستی فراهم می‌سازد (White, 1988).

به باور White (1988) ویژگی‌های چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی در برگیرنده، گروهی از شرایط همچون نوع سنگ، اندازه دانه‌ها، کانی‌های فرعی، ستبرای چینه‌ای و ... هستند. در صورتی که سنگ‌ها تا حدودی نسبت به انحلال مقاوم باشند، گسترش چشم‌اندازهای کارستی کاهش می‌یابد؛ حتی اگر نیروهای پیشبرنده فیزیکی و شیمیایی در شرایط بهینه و مطلوب باشند. وضعیت ساختاری می‌تواند معلول حرکات قدیم یا جوان زمین‌ساختی باشد. تراکم و جهت درزه و شکاف‌ها و گسل‌ها نقش مهمی در تعیین مسیرهای اولیه حرکت آب و شکل‌گیری الگوی غارها و شبکه زهکشی زیرزمینی مناطق کارستی دارد. پژوهش‌های صورت گرفته در بسیاری از مناطق کارستی نشان داده است که چاله‌های مهم کارستی توسط موقعیت تقاطع درزه و شکاف‌ها یا گسل‌های مهم شکل گرفته‌اند. در بسیاری از حالات صفحات گسلی، کنترل‌کننده معابر محلی هستند و تأثیر چیره بر راستای کلی شبکه غارهای

مرکزی، مکران، کپه داغ، گرگان-رشت، بینالود، البرز-آذربایجان، سکوه‌های پایدار، ملاترهای رنگین و چاله‌ها. محدوده مطالعاتی این پژوهش بر پایه تقسیم‌بندی بالا شامل پهنه‌های زاگرس و سنندج-سیرجان می‌شود (شکل ۵-ب).

۲-۴. داده‌ها و روش اندازه‌گیری

با توجه به زمین‌شناسی پیچیده ایران، انواع مختلفی از سنگ‌های رسوبی به‌ویژه سنگ‌های کربناتی را می‌توان در محدوده مطالعاتی یافت (James & Wynd, 1965). در این مطالعه واحدهای کربناتی بر پایه نقشه زمین‌شناسی رومی شده با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تفکیک شده‌اند. (Nogole Sadat & Almasian (1993) افزون بر این، اطلاعات توصیفی واحدهای کربناتی مختلف بر پایه Stocklin (1977) و Aghanabati (2004) استخراج شده است. بر پایه داده‌های بالا، لایه توزیع واحدهای کربناتی تهیه شده است. در جدول ۱ مهم‌ترین واحدهای کربناتی ایران ارائه شده است. در این میان واحدهای کربناتی آسماری، بیستون و سروک، مهم‌ترین واحدهای کربناتی در محدوده مطالعاتی زاگرس به شمار می‌روند (Raesi & Kowsar, 1997). در این پژوهش واحدهای کربناتی به ۴ گروه تقسیم‌بندی شده‌اند. این ۴ گروه عبارتند از آهک خالص (pure limestone)؛ دولومیت خالص (pure dolomite) شامل واحدهای کربناتی کاملاً آهکی یا دولومیتی؛ آهک ناخالص (impure limestone)؛ دولومیت ناخالص (impure dolomite) شامل لایه‌های آهکی یا دولومیتی با میان‌لایه‌های غیر کربناتی. در این رده‌بندی واحدهای آهک مارنی یا دولومیت مارنی نیز در گروه واحدهای کربناتی ناخالص رده‌بندی شده‌اند. در ضمن با توجه به اینکه در این پژوهش هدف کارست کربناتی بوده است، واحدهای تخریری مانند نمک و ژپس در پهنه‌بندی لحاظ نشده‌اند. توزیع واحدهای کربناتی بر پایه سن و سنگ‌شناسی با لحاظ مطالب گفته شده در شکل‌های ۶-الف و ب ارائه شده است. بر پایه این شکل از مجموع ۲۰۵۵۸۹ کیلومتر مربع واحدهای کربناتی سطح ایران (۱۲/۶۲ درصد از سطح ایران) حدود ۱۰۹۳۱۳ کیلومتر مربع (۶/۷ درصد) از سطح ایران) در منطقه مطالعاتی قرار گرفته است. از این میزان واحدهای آهک خالص، دولومیت خالص، آهک ناخالص و دولومیت ناخالص به ترتیب ۴۱۵۱۰ (۳۸ درصد)، ۶۹۵۳ (۶/۴ درصد)، ۵۵۱۷۲ (۵۰/۴ درصد) و ۵۶۳۸ (۵/۲ درصد) کیلومتر مربع را به خود اختصاص داده‌اند. نمودار ارائه شده در شکل ۷ توزیع واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی (زاگرس و سنندج-سیرجان) را نسبت به دیگر واحدهای ریخت‌زمین‌ساختی ایران نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که منطقه مطالعاتی زاگرس و سنندج-سیرجان به ترتیب ۴۵/۵ درصد و ۱۶/۶ درصد از واحدهای کربناتی کل کشور را به خود اختصاص می‌دهد.

ستبرای چینه‌های واحدهای کربناتی عاملی است که می‌تواند بر گسترش کارست تأثیرگذار باشد. در حالی که ستبرای واحدهای کربناتی در سواحل آدریاتیک به بیش از ۹۰۰۰ متر می‌رسد. در ایران به ندرت واحدهای کربناتی با ستبرای بیش از ۱۰۰۰ متر را می‌توان یافت. ستبرای متوسط واحدهای کربناتی در ایران در بیشتر موارد کمتر از ۵۰۰ متر است. در میان واحدهای زمین‌شناسی کربناتی ایران، سازند بیستون ستبرایی میان ۸۰۰ تا ۱۹۰۰ متر دارد. افزون بر این، واحدهای کربناتی با ستبرای کمتر از ۵۰ متر که میان واحدهای مقاوم در برابر انحلال (مانند شیل) قرار گرفته‌اند نیز در ایران عمومیت دارند.

شکل ۸-الف توزیع واحدهای کربناتی بر حسب ستبرای و جدول ۱ ستبرای مهم‌ترین واحدهای کربناتی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. واحدهای بیستون، سروک، مزدوران، آسماری، لار و زیارت مهم‌ترین واحدهای کربناتی از دید ستبرای چینه‌ای هستند که واحدهای آسماری، بیستون و سروک متعلق به منطقه مطالعاتی زاگرس هستند. لازم به یادآوری است که غار پرو به عنوان ژرف‌ترین غار ایران (۷۵۱ متر) در واحدهای کربناتی بیستون گسترش یافته است (Raesi, 2002). دیگر متغیر مهم در گسترش کارست، درزه‌ها و شکاف‌ها و گسل‌های موجود در واحدهای

گسترش محلی کارست مؤثر باشد اشاره‌ای نشده است. برای نمونه مخازن قدیمی نفت و گاز و یا فعالیت‌های آتشفشانی می‌توانند به‌طور محلی منابع گاز H_2S و CO_2 به شمار آیند که نقش محلی ولی مؤثری در گسترش کارست هیپوژنیک (Hypogenic Karstification) دارند. در واقع در این مدل انتظار از میزان گسترش کارست بر پایه یک سری از متغیرهای مؤثر ارزیابی شده بوده و بنابراین ممکن است نسبت به واقعیت کمی انحراف نیز داشته باشد.

در این پژوهش به منظور محاسبه شاخص گسترش کارست بر پایه مدل تفهیمی (White, 1988)، لایه‌های پهنه‌ای از متغیرهای مستقل مؤثر در گسترش کارست در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شده و شاخص گسترش کارست بر پایه معادله‌ای که متغیرهای نیروهای پیش‌برنده فیزیکی و شیمیایی و وضعیت آب‌زمین‌شناختی را تلفیق می‌کند، به دست آمده است. داده‌های اولیه که به عنوان لایه‌های ورودی به کار گرفته شده‌اند از منابع مختلفی گردآوری شده‌اند که به آنها اشاره خواهد شد. ۶ لایه ورودی مدل عبارتند از لایه برجستگی توپوگرافیک (R_p)، وضعیت آب‌وهوایی حال (M_p) و گذشته (G_p) که بر پایه پهنه‌های مورفوتونیک و هوازنگی شیمیایی تهیه شده‌اند، نوع سنگ کربناتی (C_p)، وضعیت زمین‌ساختی (به‌طور خاص تراکم گسل‌ها) (T_p) و ستبرای چینه‌های سنگ کربناتی (S_p). هر یک از این ۶ متغیر بر پایه میزان اهمیت در گسترش کارست وزن‌دهی و رده‌بندی شده‌اند. در پایان نقشه شاخص گسترش کارست بر پایه روابط ذیل به دست آمده است (شکل ۴):

$$K_p = CF \cdot HF \quad (1)$$

در این رابطه CF عامل فیزیکو شیمیایی و HF عامل آب‌زمین‌شناختی است. مقادیر این دو متغیر به شرح ذیل به دست می‌آید:

$$CF = M_p M_w + G_p G_w + R_p R_w \quad (2)$$

$$HF = T_p T_w + S_p S_w + C_p C_w \quad (3)$$

بر پایه روش یاد شده، دیده می‌شود که شرایط آب‌وهوایی و حضور سنگ انحلال‌پذیر مهم‌ترین مؤلفه‌ها در محاسبه شاخص گسترش کارست هستند. به‌طور کلی در صورت نبود سنگ انحلال‌پذیر، گسترش کارست متوقف می‌شود. از سوی دیگر در صورت نبود آب کافی (بارش)، گسترش کارست در سنگ‌های به شدت انحلال‌پذیر رخ نخواهد داد. بنابراین در تدوین شاخص گسترش کارست مقدار K_p حاصل ضرب دو متغیر CF (عامل فیزیکو شیمیایی) و HF (عامل آب‌زمین‌شناختی) در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم کاهش مقدار هر یک از دو عامل سنگ‌شناسی و آب‌وهوا سبب کاهش شاخص گسترش کارست و نبود هر یک سبب محاسبه عدد صفر برای شاخص گسترش کارست خواهد شد. در حقیقت بر پایه این روش، سنگ کربناتی با ستبرای کافی شرط بنیادین در گسترش کارست (با وزن بالاتر) و وضعیت زمین‌ساختی عامل مؤثر در سرعت گسترش کارست (با وزن کمتر) خواهد بود. همچنین مهیا بودن شرایط آب‌وهوایی مناسب به عنوان عامل بنیادین در گسترش کارست (با وزن بالاتر) و برجستگی توپوگرافیک به عنوان عامل مؤثر در سرعت پدیده کارست (با وزن کمتر) در نظر گرفته شده است.

۲-۳. محدوده مطالعاتی

ایران سرزمینی پهناور با مساحتی بیش از ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع در قلب خاورمیانه قرار گرفته است. منطقه مطالعاتی بیشتر شامل ارتفاعات زاگرس در بخش باختر و جنوب باختری است که واحدهای ارتفاع‌ساز آن را بیشتر، سنگ‌های کربناتی انحلال‌پذیر تشکیل داده است. (Stocklin (1968), Berberian & King (1981), Eftekharnazhad (1973) و بسیاری دیگر از پژوهشگران علوم زمین، سرزمین ایران را به واحدهای مختلف ساختاری و رسوبی تقسیم کرده‌اند. (Nabavi (1976) واحدهای مهم ساختاری را ارائه کرد که این تقسیم‌بندی بنیادین برای تقسیم‌بندی ریخت‌زمین‌ساختی ایران به شمار آمده است (شکل ۵-الف). بر پایه این تقسیم‌بندی نواحی مهم ریخت‌زمین‌ساختی ایران عبارتند از زاگرس، سنندج-سیرجان، ایران

رقومی ارتفاعی موسوم به (ASTER Global Digital Elevation Model) GDEM استفاده شده است (شکل ۱۰-ب). این لایه با تفکیک مکانی ۳۰ متر بر پایه داده‌های باند سوم سنجنده آستر توسط تیم مشترک آمریکا و ژاپن تهیه و منتشر شده است (Japan & US ASTER Science Team, 2009).

برخی لندفرم‌های کارستی مانند دولین‌ها، غارها و چشمه‌های کارستی شاخص‌های خوبی برای ارزیابی میزان گسترش کارست به شمار می‌آیند. چشمه‌های کارستی اطلاعات مهمی در زمینه گسترش کارست در اختیار می‌گذارند (Ebrahimi et al., 2007) که برای ارزیابی شدت گسترش کارست‌های فعال مناسب است. استفاده از چشمه‌های کارستی برای ارزیابی کارست دیرینه عملی نیست؛ در حالی که غارها می‌توانند شاخص خوبی برای ارزیابی گسترش کارست دیرینه باشند. در این پژوهش بانک اطلاعات جامعی از غارهای مهم و چشمه‌های کارستی منطقه مطالعاتی تهیه شد. این داده‌ها برای کنترل درجه گسترش کارست پیش‌بینی شده توسط مدل بر پایه شاخص گسترش کارست به کار گرفته شده است. کامل‌ترین بانک اطلاعاتی که در زمینه غارهای ایران منتشر شده توسط Raciis & Laumans (2009) تهیه شده است. از آنجا که موقعیت دقیق بسیاری از این غارها در منبع یاد شده ارائه نشده، از دیگر منابع همچون Salahi (2008)، Javanshad (1995) و برخی دیگر از سایت‌های مفید مانند سایت غارهای ایران (www.irancaves.com) برای تهیه و تکمیل بانک اطلاعات غارهای منطقه مطالعاتی استفاده شده است. اگر چه به کارگیری طول غارها به جای تعداد غارها در بررسی صحت شدت کارستی شدن مناسب‌تر است؛ ولی متأسفانه به جز در مورد غارهای مهم، اطلاعاتی در زمینه طول معابر اصلی غارها در دسترس نیست. بر پایه داده‌های بالا در مجموع ۴۹۱ غار کربناتی در ایران با موقعیت دقیق گردآوری شد (تعداد غارها بیش از ۹۰۰ مورد است ولی موقعیت بیشتر آنها نامشخص است) که ۲۴۷ مورد از آنها در منطقه مطالعاتی زاگرس قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱-ب). از ۲۴۷ غار کربناتی در منطقه مطالعاتی، ۱۳۱ دهنه در آهک خالص، ۹۵ دهنه در آهک‌های ناخالص، ۱۶ دهنه در دولومیت خالص و ۵ دهنه در دولومیت‌های ناخالص شکل گرفته‌اند. چشمه‌های کارستی-دیگر خصیصه چشم‌اندازهای کارستی فعال- در این پژوهش گردآوری شده‌اند. این داده‌ها از مرکز تحقیقات کارست کشور گردآوری شده است (مؤسسه تحقیقات آب کشور، چاپ نشده). داده‌های مورد استفاده شامل موقعیت چشمه‌های کارستی، نوع سازند زمین‌شناسی تغذیه‌کننده چشمه و آبدهی آنهاست. برای کنترل نتایج حاصل از مقدار محاسباتی شاخص گسترش کارست، بهتر است از دبی بهنجار شده چشمه‌ها (دبی بر بارش) استفاده کرد؛ ولی متأسفانه داده‌های بیشتر چشمه‌ها، داده‌های میانگین بلندمدت نیست و گاه بر پایه یک مورد اندازه‌گیری گزارش شده‌اند و بنابراین در این پژوهش دبی آنها در قالب رده‌بندی‌های کلی که ملاحظه خواهد شد مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۱-الف). لازم به یادآوری است که در اینجا نیز با توجه به اهداف پژوهش چشمه‌ها و غارهای شکل گرفته در واحدهای کارستی تبحیری از فهرست حذف شده‌اند.

۲-۵. لایه‌ها اطلاعاتی ورودی مدل

بر پایه داده‌های مربوط به عوامل مؤثر بر گسترش کارست، ۶ لایه اطلاعاتی برای محاسبه شاخص گسترش کارست تهیه شده است. هر یک از لایه‌ها بر پایه رده‌بندی ارائه شده در جدول ۲ رده‌بندی شده‌اند. در مرحله بعد همه لایه‌های اطلاعاتی رده‌بندی شده به لایه‌های رستری با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر تبدیل شده‌اند.

اولین لایه اطلاعاتی لایه واحدهای کربناتی است (C_۱) که بر پایه نقشه ارائه شده در شکل ۶ تهیه شده است. لایه C_۱ پس از رده‌بندی در قالب یک فایل رستری با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر ذخیره و بر پایه جدول ۲ از یک تا چهار امتیازدهی شده است. در لایه امتیازدهی شده، امتیاز ۴ متعلق به واحدهای کربناتی خالص است که بیشترین پتانسیل را برای گسترش کارست دارند. کمترین امتیاز (یک) نیز به

کربناتی است. واحدهای کربناتی می‌توانند دارای انواع گوناگونی از ناپوستگی‌ها به ابعاد چند میلی‌متر تا پهنه‌های گسلی مهم باشند. از آنجا که بیشتر درزه‌ها و شکاف‌ها در ارتباط با گسل‌های اصلی و فرعی هستند، نقشه گسل‌ها می‌تواند به عنوان شاخص مناسبی برای این متغیر لحاظ شود. با نگاهی به نقشه زمین‌شناسی ایران می‌توان گسل را به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای ساختاری در پیکره ایران زمین دید. به باور بیشتر زمین‌شناسان کشور، بیش از ۲۰ گسل مهم با طولی بیش از ۱۰۰ کیلومتر در سطح کشور وجود دارد که بیشتر آنها در دوره کواترنر نیز فعال بوده‌اند (Nabavi, 1976). مطالعه روند گسل‌ها نشان می‌دهد که راستای NW-SE در ناحیه زاگرس عمومیت دارد. در این روش موقعیت گسل‌های اصلی و فرعی منطقه مطالعاتی بر پایه رقومی‌سازی نقشه‌های با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ ۱: سازمان زمین‌شناسی کشور صورت گرفته است (Berberian, 1976; Nogole Sadat & Almasian, 1993). نقشه موقعیت گسل‌های مهم منطقه بر پایه منابع یاد شده در شکل ۸-ب ارائه شده است. همان‌گونه که گفته شد، بارش، دما و فشار گاز دی‌اکسیدکربن از جمله مهم‌ترین جنبه‌های آب‌وهوایی مؤثر بر گسترش کارست هستند. بارش، دما و دی‌اکسیدکربن نه تنها در دوره‌های کوتاه‌مدت متغیر هستند، بلکه دارای تغییرات سیستماتیک بلندمدت نیز هستند (White, 1988) بر این باور است که بسیاری از لندفرم‌های کارستی در یک دوره ۱۰ هزار ساله تا ۱۰۰ هزار ساله شکل گرفته‌اند. بنابراین بسیاری از لندفرم‌های کارستی که امروزه دیده می‌شوند معلول شرایط آب‌وهوایی حال و گذشته‌اند. فلات ایران نیز چندین فاز آب‌وهوایی را در دوران کواترنر پشت سر گذاشته است. گرچه زمان‌بندی و سوی این تغییرات هنوز به خوبی شناسایی نشده است (Kehl, 2009). بسیاری از پژوهشگران به شرایط آب‌وهوایی سردتر و خشک‌تر در طول دوره‌های یخبالی و شرایط گرم‌تر و مرطوب‌تر در طول دوره‌های میان‌یخبالی باور دارند (Bobek, 1959 & 1963; Dodonov, 1991; Bronger, 2003; Rutter et al., 2003)؛ با این وجود برخی نیز به دوره‌های بارانی (یعنی بارش بیشتر از امروزه) در طول دوره‌های یخبالی ایران باور دارند (Busche et al., 1977; Grunert, 2002). بیشتر پژوهش‌های اخیر تأییدی بر شرایط سردتر و خشک‌تر در آخرین دوره یخبالی هستند (Thomas et al., 1997; Kehl et al., 2005)؛ ولی در دوره‌های یخبالی پیش از آن شرایط احتمالاً مرطوب‌تر از زمان حال بوده است (White, 1998) عنوان می‌کند که گسترش کارست در مناطق کاملاً خشک عربستان و آفریقا احتمالاً ناشی از دوره‌های بارانی در گذشته است.

در این پژوهش داده‌های بارش و دمای میانگین سالانه بر پایه نقشه‌های هم‌بارش و هم‌دما منتشر شده از سوی مهندسی مشاور جاماب (۱۳۷۹) به کار گرفته شده است. شکل‌های ۹-الف و ب به ترتیب لایه‌های رستری بارش و دما (با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر) را که بر پایه نقشه‌های هم‌بارش و هم‌دما یاد شده تهیه شده‌اند نشان می‌دهند. این لایه‌ها به عنوان لایه‌های بنیادین برای ساخت لایه‌های هوازدگی و مورفوژنیک (بر پایه نمودارهای Peltier (1950) شرایط حاضر استفاده شده‌اند. منابع ارائه شده در پژوهش‌های موجود (Pedrami, 1982; Mohmudi, 1988) به منظور لحاظ شرایط آب‌وهوایی گذشته به کار گرفته شده است. Mohmudi (1988) نقشه مورفوژنیک ایران را در طول دوره یخبالی بر پایه شواهد مورفولوژیک ارائه کرده است. در این پژوهش نقشه پهنه‌های مورفوژنیک منطقه مطالعاتی زاگرس برای دوره‌های یخبالی بر پایه نظر Mohmudi (1988)، خطوط مرز برف دائمی گذشته (بر پایه نظرات Pedrami (1982)، Yamani et al. (2007) و Zamani (2009) و نیز نقشه رقومی ارتفاعی کشور تهیه شده است (شکل ۱۰-الف). این لایه به عنوان لایه بنیادین برای اعمال نیروهای عملگر شیمیایی در طول دوره‌های یخبالی در نظر گرفته شده است. دیگر لایه اطلاعاتی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، لایه رقومی ارتفاعی منطقه مطالعاتی است که به عنوان پایه‌ای برای در نظر گرفتن نیروی پیش‌برنده فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از لایه

دست آمده است. بر پایه معادلات یاد شده و وزن دهی لایه‌ها، مقدار شاخص گسترش کارست (K_1) میان کمینه صفر تا بیشینه ۴۰۰ واحد خواهد بود. عدد صفر نشان‌دهنده نبود امکان گسترش کارست و عدد ۴۰۰ بیانگر پتانسیل گسترش بیشینه‌ای کارست خواهد بود. نقشه شاخص گسترش کارست در شکل ۱۵- الف ارائه شده است.

۳- بحث

مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه شاخص K_1 به ترتیب برابر با ۱۸۹، ۵۶ و ۳۶۰ است. نقشه تئوریک پتانسیل گسترش کارست (شکل ۱۵- ب) پس از رده‌بندی نقشه شاخص گسترش کارست و بر پایه رده‌بندی ارائه شده در جدول ۳ تهیه شده است. در این رده‌بندی، ۵ رده مختلف برای گسترش کارست در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، حدود ۹۷۷۳ کیلومتر مربع از واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی زاگرس (۸/۹ درصد از کل واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی زاگرس) در رده خیلی کم از پتانسیل گسترش کارست قرار می‌گیرد. همچنین ۲۴۴۳۹ کیلومتر مربع (۲۲/۴ درصد از کل واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی زاگرس) در رده کم، ۶۱۲۷۲ کیلومتر مربع (۵۶/۰ درصد از کل واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی زاگرس) در رده متوسط، ۹۴۷۱ کیلومتر مربع (۸/۷ درصد از کل واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی زاگرس) در رده زیاد و ۴۳۵۸ کیلومتر مربع (۴/۰ درصد از کل واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی زاگرس) در رده خیلی زیاد قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، ۶۸/۷ درصد از واحدهای کربناتی منطقه مطالعاتی در رده متوسط به بالا و ۳۱/۳ درصد نیز در رده پتانسیل گسترش کارست کم و خیلی کم قرار می‌گیرند (جدول ۳). چشمه‌های کارستی و غارها به منظور ارزیابی دقت نقشه تئوریک کارست به کار گرفته شده‌اند. همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، تعداد غارهای قرار گرفته در رده خیلی کم پتانسیل گسترش کارست ۱۴ عدد، در رده کم ۵۰ عدد، در رده متوسط ۱۳۲ عدد، در رده زیاد ۳۴ عدد و در رده خیلی زیاد ۱۷ غار است. در جدول ۳ ستون دیگری با عنوان تراکم غارها ارائه شده است. این ستون نماینده تعداد غارها در واحد سطح هر گروه است. تراکم غارها برای رده‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد برابر با ۰/۰۰۱۴، ۰/۰۰۲۰، ۰/۰۰۲۲، ۰/۰۰۳۶ و ۰/۰۰۳۹ است که روند افزایشی خوب و قابل تطابقی را با رده‌های تئوریک گسترش کارست نشان می‌دهد. بر پایه اطلاعات موجود درباره دبی چشمه‌های کارستی، از ۳۶۸۰ دهنه چشمه کارستی، ۵۹۱ دهنه دبی بیشتر از ۱۰ لیتر بر ثانیه دارند. در حدود ۳۱۵ دهنه نیز دبی بالاتر از ۲۵ لیتر بر ثانیه و ۱۴۸ دهنه نیز دبی بیش از ۵۰ لیتر بر ثانیه دارند. همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، تعداد چشمه‌های کارستی با دبی بیش از ۱۰ لیتر بر ثانیه در رده خیلی کم پتانسیل گسترش کارست ۳۴ عدد، در رده کم ۹۵ عدد، در رده متوسط ۳۰۰ عدد، در رده زیاد ۱۰۵ عدد و در رده خیلی زیاد ۵۷ عدد است. تراکم چشمه‌ها (تعداد چشمه‌ها بر واحد سطح) برای چشمه‌ها با دبی بیش از ۱۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب در رده پتانسیل خیلی کم گسترش کارست ۰/۰۰۳۵، در رده کم ۰/۰۰۳۹، در رده متوسط ۰/۰۰۴۹، در رده زیاد ۰/۰۱۱۱ و در رده خیلی زیاد برابر با ۰/۰۱۳۱ است. همان‌گونه که دیده می‌شود که روند افزایشی تراکم چشمه‌ها با رده‌های تئوریک گسترش کارست همخوانی خوبی دارد. نتایج مشابهی برای تراکم چشمه‌ها با دبی‌های بالاتر از ۲۵ لیتر بر ثانیه و ۵۰ لیتر بر ثانیه دیده شده است (جدول ۳).

نتایج مدل را می‌توان با دیگر لندفرم‌های کارستی نیز مورد ارزیابی قرار داد. متأسفانه اطلاعات جامع در این زمینه در سطح کشور موجود نیست و بنابراین سعی شده است تا نتایج مدل با برخی داده‌های محلی دیگر و بر پایه منابع موجود مورد بررسی قرار گیرد. یکی از نواحی مهم کارستی کشور رخنمون‌های آهکی در منطقه زردکوه بختیاری است (باختر شهر کرد). در این منطقه لندفرم‌های کارستی فراوانی مانند کارن، شفت و دره‌های خشک را می‌توان دید (Edgell, 1998). لندفرم‌های

دولومیت ناخالص تعلق دارد (شکل ۱۲- ب). لایه اطلاعاتی ستبرای چینه‌شناسی واحدهای کربناتی (S_1) دیگر لایه اطلاعاتی است که بر پایه نقشه شکل ۶ تهیه شده است. این لایه نیز بر پایه رده‌بندی ارائه شده در جدول ۲ رده‌بندی و در قالب فایل رستری با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر ذخیره شده است. امتیازدهی پایانی این لایه میان ۱ تا ۴ بر پایه جدول ۲ صورت گرفته است (شکل ۱۲- الف). لایه اطلاعاتی وضعیت زمین‌ساختی (به‌طور ویژه اثر درزه و شکاف و گسل‌ها (T_1)) نیز بر پایه شکل ۸ تهیه شده است. در این بخش متغیری با عنوان ضریب تراکم گسل‌ها برای کمی‌سازی اثر گسل‌ها تعریف شده است. به این منظور مجموع طول گسل‌های اصلی و فرعی (بر حسب متر) بر مساحت هر واحد کربناتی (بر حسب کیلومتر مربع) تقسیم می‌شود. به دلیل اهمیت نسبی بیشتر گسل‌های اصلی نسبت به گسل‌های فرعی، ضریب ۲ برای گسل‌های اصلی لحاظ می‌شود. پس از محاسبه ضریب تراکم گسل‌ها برای هر یک از واحدهای مجزای کربناتی، لایه پایانی (T_1) بر پایه جدول ۲ رده‌بندی و امتیازدهی و در قالب فایل رستری با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر ذخیره شده است (شکل ۱۲- ج). لایه اطلاعاتی شاخص اثر برجستگی توپوگرافیک (R_i) بر پایه مدل رقومی ارتفاعی ارائه شده در شکل ۱۰ تهیه شده است. متوسط گرادیان سطحی هر واحد کربناتی برای کمی‌سازی اثر توپوگرافی برای هر واحد کربناتی به‌طور جداگانه به دست آمده است. به این منظور مقادیر بیشینه و کمینه ارتفاعی هر واحد کربناتی با استفاده از امکانات نرم‌افزار ArcGIS استخراج و اختلاف آن بر ریشه دوم مساحت واحد کربناتی ($(H_{max} - H_{min})/A^{1/2}$) به عنوان گرادیان متوسط هر واحد در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه مقدار متوسط گرادیان در هر واحد کربناتی، لایه R_i بر پایه جدول ۲ رده‌بندی و امتیازدهی و در پایان در فرمت لایه رستری با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر ذخیره شده است (شکل ۱۴- ج).

لایه اطلاعاتی بیانگر وضعیت آب‌وهوایی حال منطقه (M_1) بر پایه نقشه‌های بارش و دمای ارائه شده در شکل ۹ و نمودارهای (Peltier (1950) تهیه شده است. بر پایه امکانات سامانه اطلاعات جغرافیایی، موقعیت پیکسل‌های ۱۰۰ متری بارش و دما روی نمودارهای هوازدگی و هوازدگی شیمیایی پیاده و رده هوازدگی هر یک از پیکسل‌ها از این نمودارها استخراج و در پایان نقشه نواحی هوازدگی منطقه مطالعاتی زاگرس تهیه شده است (شکل ۱۳- ب). نقشه ۱۳- ب امکان ارزیابی شدت هوازدگی و نوع هوازدگی را در مناطق مختلف زاگرس فراهم ساخته است. در پایان لایه M_i بر پایه رده‌بندی و امتیازدهی لایه رستری با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر بر پایه رده‌بندی ارائه شده در جدول ۲ تهیه شده است (شکل ۱۴- ب).

آخرین لایه اطلاعاتی که بیانگر شرایط آب‌وهوایی گذشته و شدت هوازدگی در نواحی مختلف منطقه مطالعاتی است (G_i) بر پایه مقایسه نقشه ارائه شده در شکل ۱۰ و نمودارهای هوازدگی و نواحی مورفونیک (Peltier (1950) برآورد شده است. نقشه به دست آمده در این مرحله (شکل ۱۳- الف) به عنوان مبنای ارزیابی شدت هوازدگی (شیمیایی) در دوره‌های یخچالی منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده است. در پایان لایه اطلاعاتی G_i بر پایه نقشه ۱۳- الف و رده‌بندی ارائه شده در جدول ۲، رده‌بندی و امتیازدهی و در پایان در قالب فایل رستری با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر ذخیره شده است (شکل ۱۴- الف).

۲-۶. محاسبه شاخص گسترش کارست

پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، وزن مناسب برای هر لایه اطلاعاتی لحاظ شد. وزن به کار گرفته شده برای هر لایه میان ۱ تا ۳ در نظر گرفته شده است. وزن ۳ برای لایه‌های اطلاعاتی که اهمیت بیشتری در گسترش کارست دارند لحاظ شده است (جدول ۲). بالاترین وزن (۳) برای لایه واحدهای کربناتی، وزن ۲ برای آب‌وهوای گذشته و حال و کمترین وزن (یک) نیز برای دیگر لایه‌های اطلاعاتی به کار گرفته شده است. شاخص گسترش کارست بر پایه روابط ۱ تا ۳ با استفاده از Raster Calculator در مجموعه ابزار Spatial Analyst Tools نرم‌افزار ArcGIS به

(T_1) و ستبرای چینه‌های سنگ کربناتی (S_1) می‌شوند. وزن‌دهی به لایه‌های مختلف بر پایه اهمیت لایه‌ها در گسترش کارست اعمال و در پایان بر پایه روش‌شناسی ارائه شده، نقشه شاخص گسترش کارست منطقه زاگرس تدوین شد. در پایان بر پایه رده‌بندی نقشه شاخص گسترش کارست، نقشه تئوریک پتانسیل گسترش کارست منطقه مطالعاتی تهیه شد. چشمه‌های مهم کارستی به همراه غارهای مهم ثبت شده در منطقه زاگرس به منظور ارزیابی نقشه تئوریک پتانسیل گسترش کارست به کار گرفته شد. ملاحظه می‌شود که تطابق بسیاری خوبی میان رده‌های تئوریک گسترش کارست و تراکم چشمه‌ها و غارها در منطقه مشاهده‌ای وجود دارد. بر پایه نقشه تئوریک گسترش کارست منطقه زاگرس، واحدهای کربناتی ۲۵/۷ درصد از مساحت کل منطقه مطالعاتی (۱۰۹۳۱۳ کیلومتر مربع) را به خود اختصاص می‌دهند که ۱۲/۷ درصد آنها (۱۳۸۲۹ کیلومتر مربع) در رده گسترش کارستی زیاد تا خیلی زیاد قرار می‌گیرند. واحدهای کربناتی با رده زیاد عموماً در بخش میانی و باختری زاگرس قرار گرفته‌اند.

از جمله مزایای نقشه تهیه شده در این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین، به کارگیری نقشه‌های با دقت بالاتر و به کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی است. از جمله مزایای دیگر این نقشه، توجه به دیگر عوامل مؤثر در گسترش کارست (به جز سنگ‌شناسی) است. همچنین با معرفی متغیری با نام شاخص گسترش کارست، امکان ارزیابی میزان گسترش کارست در نواحی مختلف زاگرس فراهم می‌شود. در این پژوهش همچنین موقعیت چشمه‌های مهم کارستی و غارهای مهم ثبت شده در منطقه نیز تهیه و به عنوان پایه‌ای برای کنترل نقشه‌های تولید به کار گرفته شد.

این پژوهش با وجود مزایای که نسبت به پژوهش‌های پیشین داشته است، ایراداتی نیز دارد که باید در پژوهش‌های بعدی در نظر گرفته شود. از جمله مهم‌ترین این ایرادات نبود امکان اعمال اثر فشار گاز دی‌اکسید کربن (P_{CO_2}) در گسترش کارست بوده است که دلیل آن نبود امکان به کارگیری و کمی‌سازی این متغیر در زمان حال و دوره‌های یخچالی است. افزون بر این، در این پژوهش اثرات احتمالی عوامل مؤثر بر گسترش کارست‌های ژرف (کارست هایپوژنیک) که می‌تواند اثرات محلی مهمی در گسترش کارست داشته باشد، در نظر گرفته نشده است. در این پژوهش تنها به اثر گسل‌ها و درزه شکاف‌های زمین‌ساختی توجه شده است؛ در حالی که عواملی چون چین‌خوردگی‌ها و ناپیوستگی‌ها نیز می‌توانند در گسترش کارست نقش مؤثری داشته باشند که البته در این پژوهش از آنها صرف نظر شده است. در آخر توصیه می‌شود در مطالعات تکمیلی از روش‌های رتبه‌دهی سلسله مراتبی یا فازی در رده‌بندی و وزن‌دهی لایه‌ها استفاده شود.

سپاسگزاری

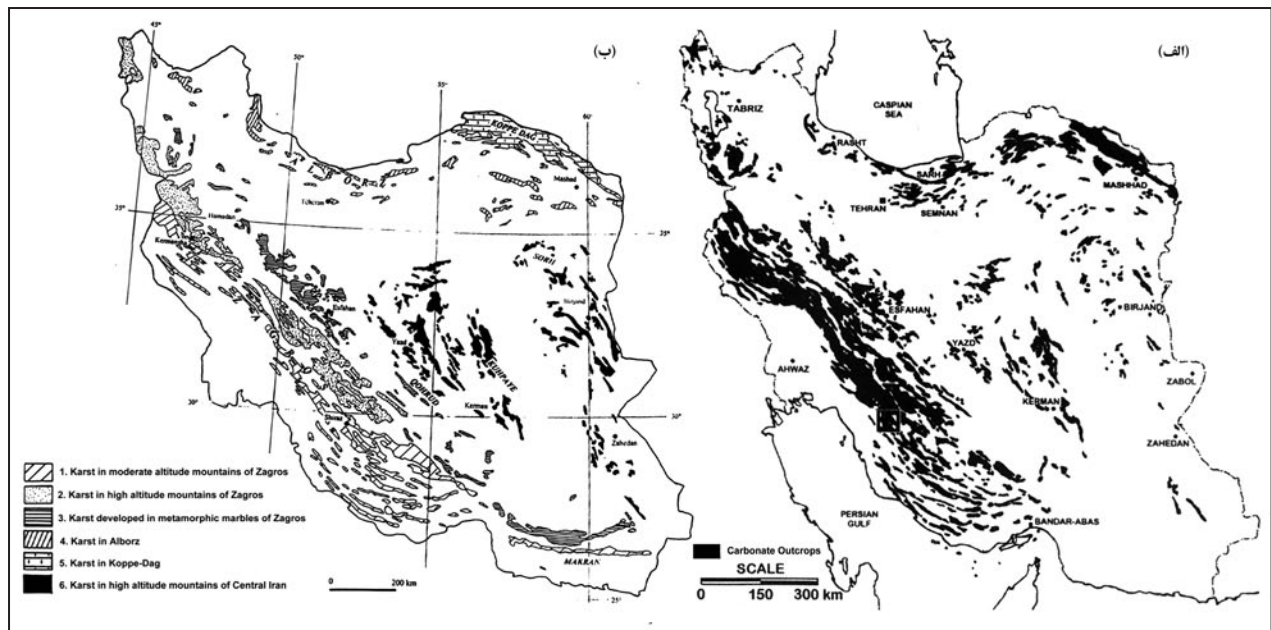
این پژوهش با حمایت معنوی گروه جغرافیای طبیعی دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی انجام شده است. بدین وسیله از مدیریت گروه جغرافیای طبیعی این دانشکده سپاسگزاری می‌شود. همچنین از مدیریت شرکت آب منطقه‌ای اصفهان و مرکز مطالعات کارست کشور که برخی از داده‌های مورد نیاز این پژوهش را در اختیار نگارندگان قرار داده‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

مشابهی در خاور ارتفاعات زردکوه در محدوده طرح‌های آبی مهمی همچون تونل‌های کوه‌رننگ گزارش شده است. بر پایه مدل متغیری، پتانسیل گسترش کارست این ناحیه در رده گسترش کارستی زیاد تا خیلی زیاد است (ناحیه ۳ در شکل ۱۵-ب). انواع گوناگونی از لندفرم‌های کارستی مانند دولین، کارن و چشمه‌های کارستی گسترش یافته در آهک سروک در محدوده چشمه برقان در منطقه سپیدان فارس شناسایی شده است (Raeisi & Karami, 1997). بر پایه مدل متغیری، پتانسیل گسترش کارست در این ناحیه در رده گسترش کارستی زیاد قرار گرفته است (ناحیه ۴ در شکل ۱۵-ب).

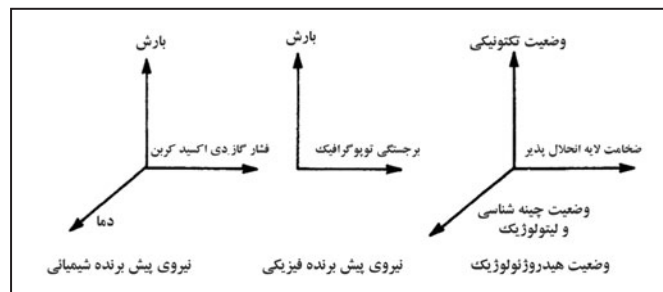
(Sayarinezhad & Naghibian (1998) به بررسی وضعیت گسترش کارست در واحدهای کربناتی تاقدیس راوندی در کبیرکوه پرداخته‌اند. این بررسی‌ها نشان داده است که به‌جز کارن‌های سطحی دیگر لندفرم‌های کارستی در این منطقه دیده نشده و جریان چیره آب در سامانه کارستی از نوع انتشاری است. این منطقه بر پایه مدل متغیری دارای پتانسیل گسترش کارست در رده گسترش کارستی کم قرار گرفته است (ناحیه ۵ در شکل ۱۵-ب). غار پرو به عنوان یکی از ژرف‌ترین غارهای جهان در ۲۵ کیلومتری شمال کرمانشاه قرار گرفته و در واحدهای کربناتی بیستون گسترش یافته است. در این منطقه افزون بر غار یاد شده بسیاری دیگر از لندفرم‌های کارستی همچون دولین، شفت و انواع کارن گزارش شده است (Maghsoodi et al., 2009). بر پایه مدل متغیری، پتانسیل گسترش کارست این ناحیه در رده گسترش کارستی زیاد تا خیلی زیاد است (ناحیه ۲ در شکل ۱۵-ب). رخنمون واحدهای کارستی به همراه انواع لندفرم‌های کارستی توسط (Minooei et al., 2010) در ناحیه شاهو گزارش شده است. در این منطقه انواع کارن و به ویژه دولین گسترش یافته در رخنمون آهک‌های بیستون گزارش شده است. بر پایه مدل متغیری، پتانسیل گسترش کارست این ناحیه در رده گسترش کارستی زیاد تا خیلی زیاد است (ناحیه ۱ در شکل ۱۵-ب).

۴- نتیجه‌گیری

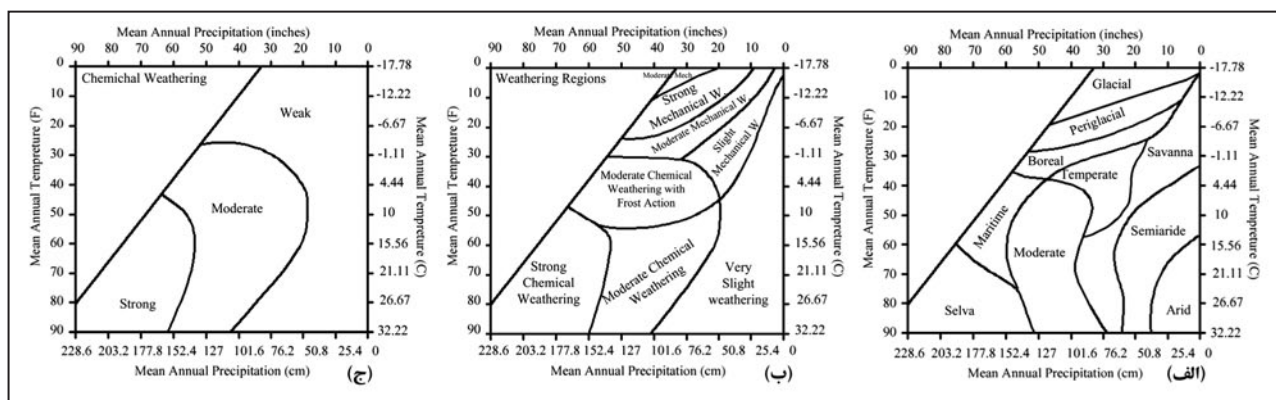
هدف اصلی این پژوهش تهیه نقشه تئوریک پتانسیل گسترش کارست در منطقه زاگرس بود و در این راستا نقش عامل‌های مهم مؤثر بر گسترش کارست مورد توجه قرار گرفت. الگوریتم به کار گرفته شده در این پژوهش بر پایه مدل تفهیمی (White (1988) تدوین شد. بر پایه مدل تفهیمی (White (1988) عواملی چون سنگ‌شناسی، وضعیت زمین‌ساختی، برجستگی توپوگرافیک، بارش، دما و ستبرای واحدهای کربناتی نقش عمده‌ای در گسترش کارست دارند. به منظور اعمال اثر بارش و دما، نقش آنها در شدت هوازدگی شیمیایی در نظر گرفته شد. به این منظور درجه هوازدگی مناطق مختلف منطقه مطالعاتی برای دوره‌های یخچالی و شرایط آب‌وهوایی موجود و بر پایه نمودارهای (Peltier (1950) مشخص شد. در این پژوهش الگوریتم جدید منطبق با مدل تفهیمی (White (1988) تدوین و شاخصی با عنوان شاخص گسترش کارست تعریف شد (K_i). به منظور محاسبه این شاخص، لایه‌های مختلف معرف عوامل مؤثر بر گسترش کارست تهیه و امتیازبندی شد. این لایه‌ها شامل لایه برجستگی توپوگرافیک (R_1)، وضعیت آب‌وهوایی حال (M_1) و گذشته (G_1)، نوع سنگ کربناتی (C_1)، وضعیت زمین‌ساختی (به‌طور خاص تراکم گسل‌ها)



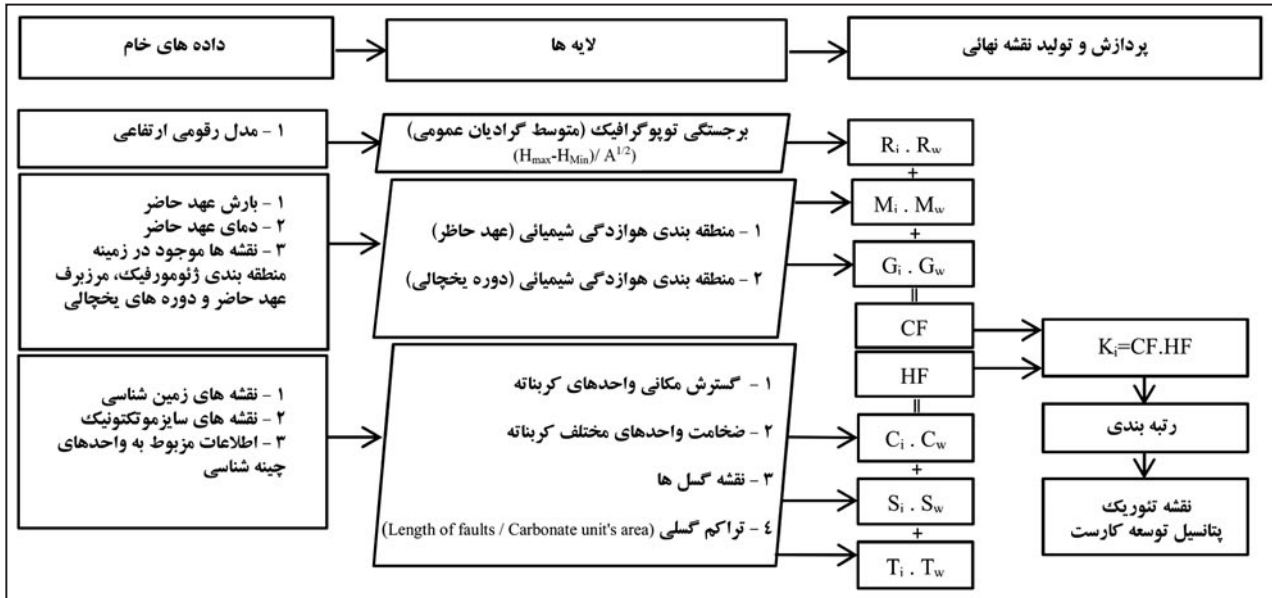
شکل ۱- توزیع واحدهای کارستی ایران بر پایه نظر الف) (Raesi & Kowsar (1997)؛ ب) (Dumas (1998).



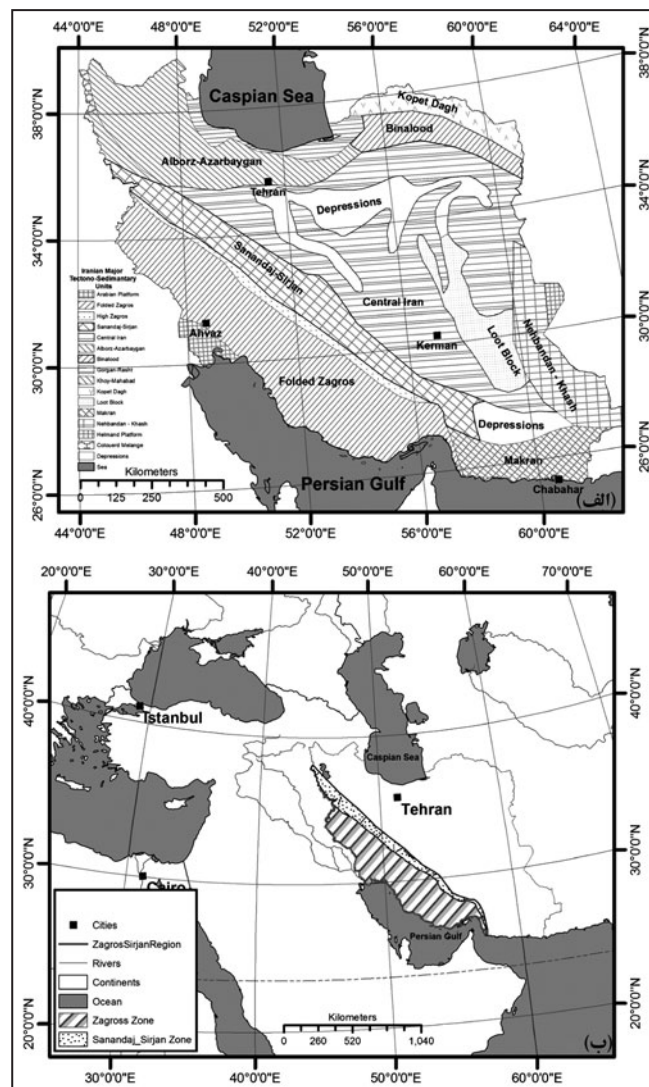
شکل ۲- سامانه مختصات توصیف کننده عوامل مستقل و مؤثر در گسترش کارست (White, 1988).



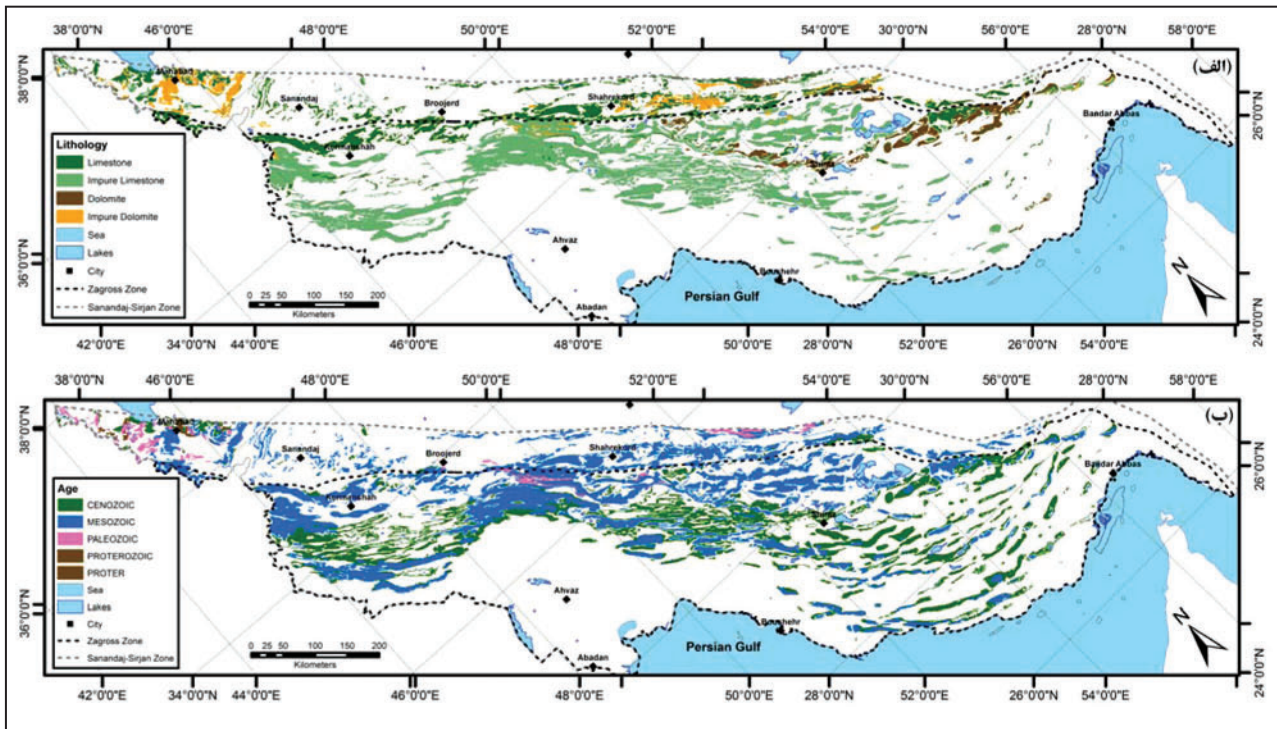
شکل ۳- نمودارهای نواحی الف) مورفونیک؛ ب) هوازدگی؛ ج) هوازدگی شیمیایی (Peltier, 1950؛ باز رسم توسط نگارندگان).



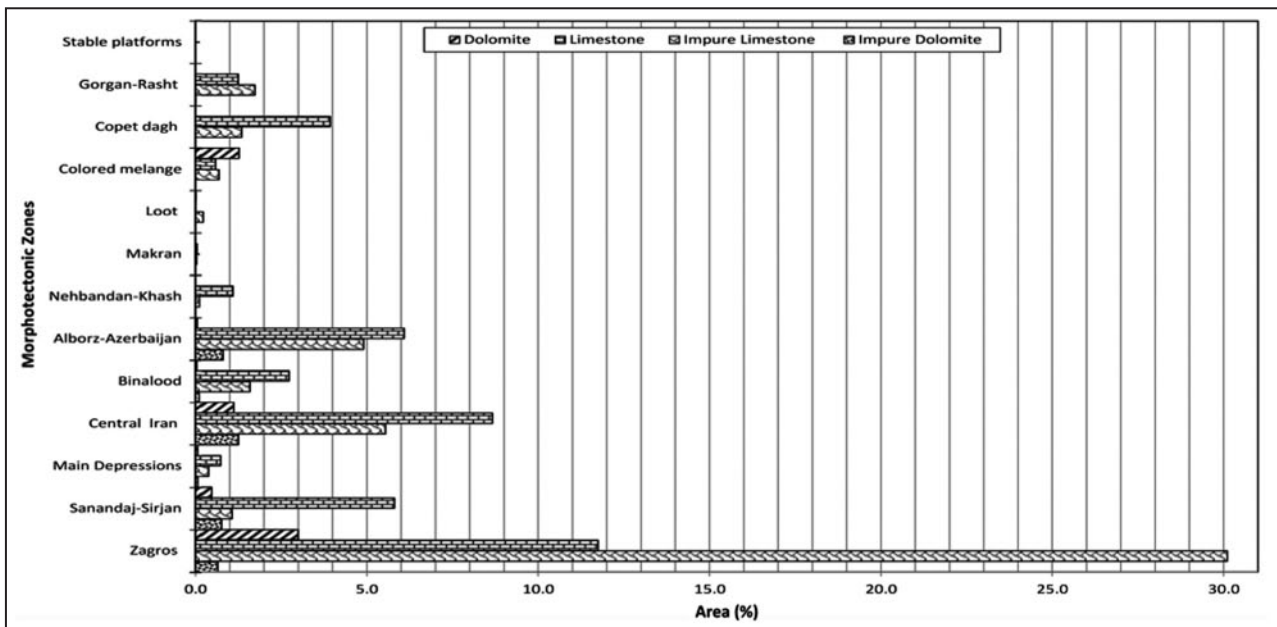
شکل ۴- روش محاسبه نقشه پهنه‌ای شاخص گسترش کارست و نقشه تنوریک گسترش کارست در سامانه اطلاعات جغرافیایی.



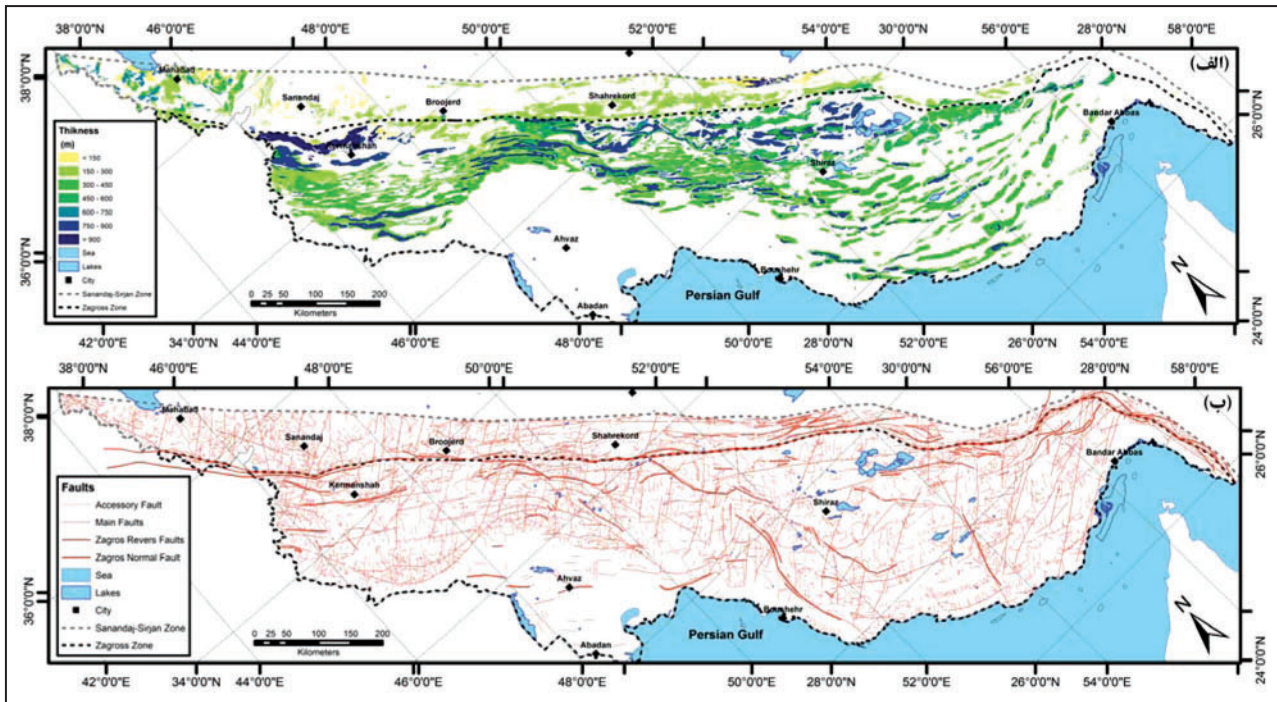
شکل ۵- الف) رده‌بندی ریخت‌زمین‌ساختی ایران (Nabavi, 1976)؛ ب) موقعیت پهنه‌های زاگرس و سندج- سیرجان در ایران و خاور میانه.



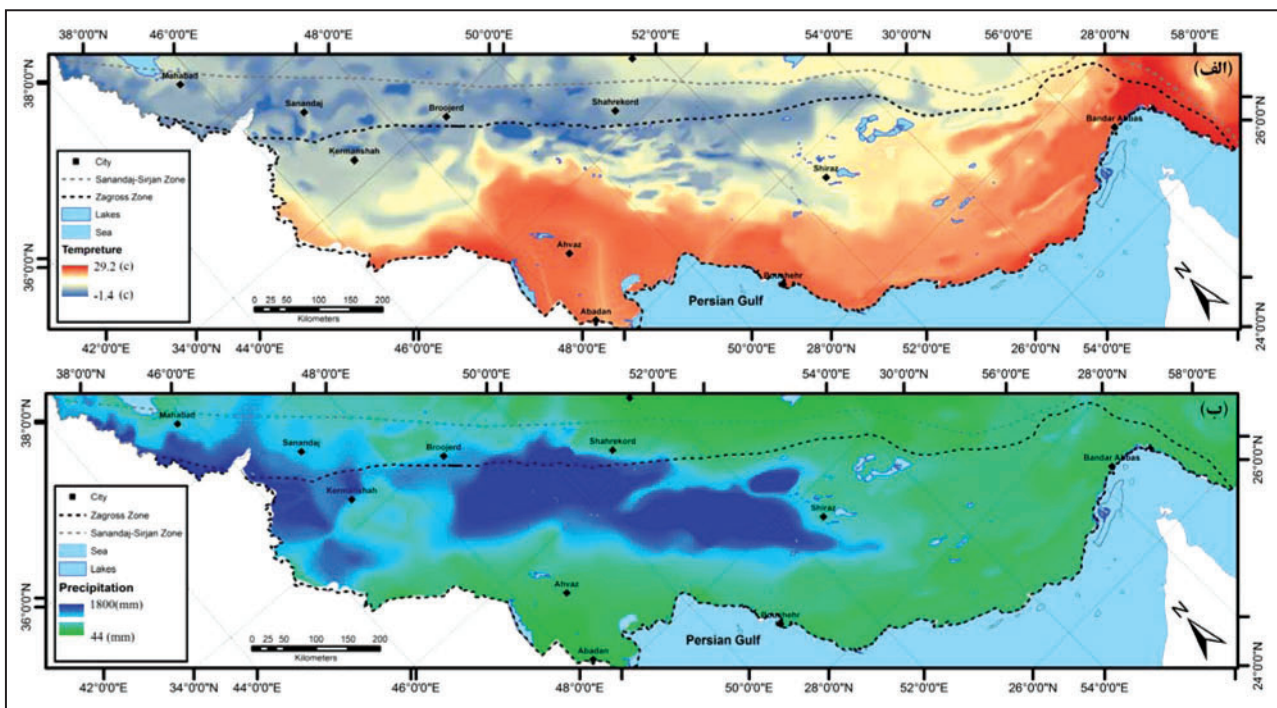
شکل ۶- توزیع واحدهای کربناتی در منطقه مطالعاتی بر پایه: الف) سنگ‌شناسی؛ ب) سن (Stocklin 1977; Nogole Sadat & Almasian, 1993; Aghanabati, 2004).



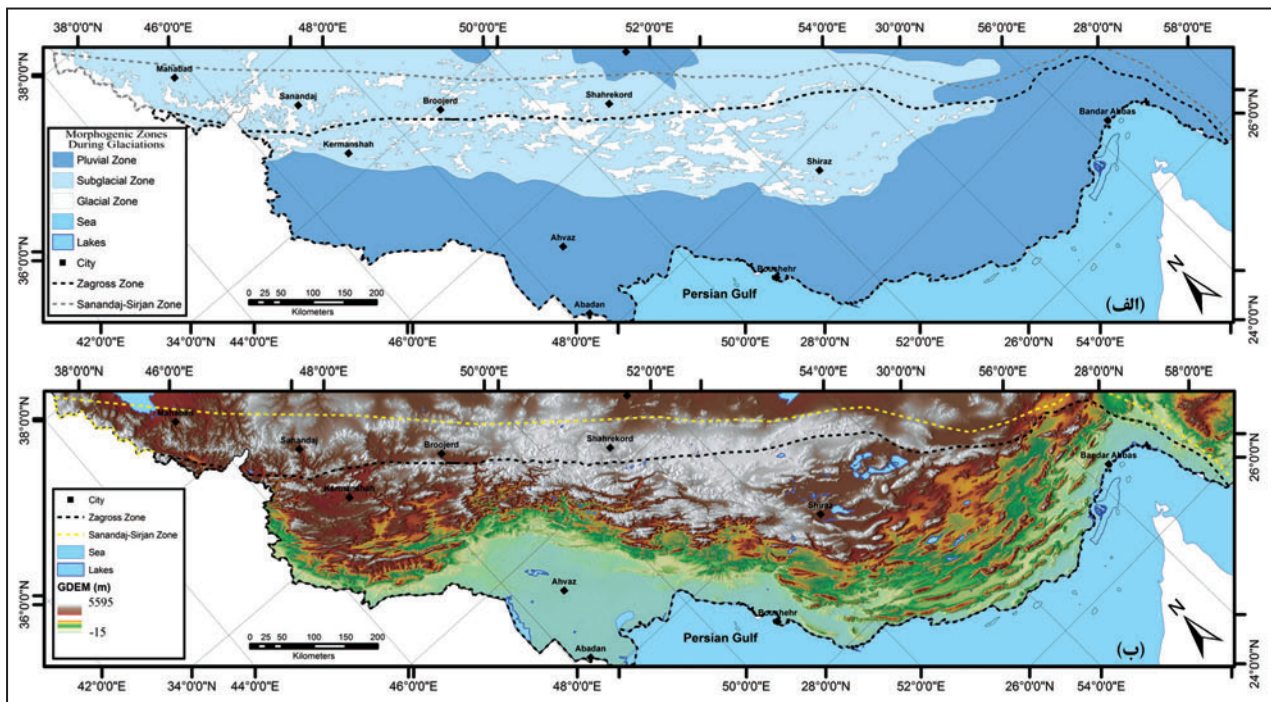
شکل ۷- درصد واحدهای کربناتی مختلف در منطقه مطالعاتی (زاگرس و سنندج- سیرجان) نسبت به دیگر پهنه‌های ساختاری ایران.



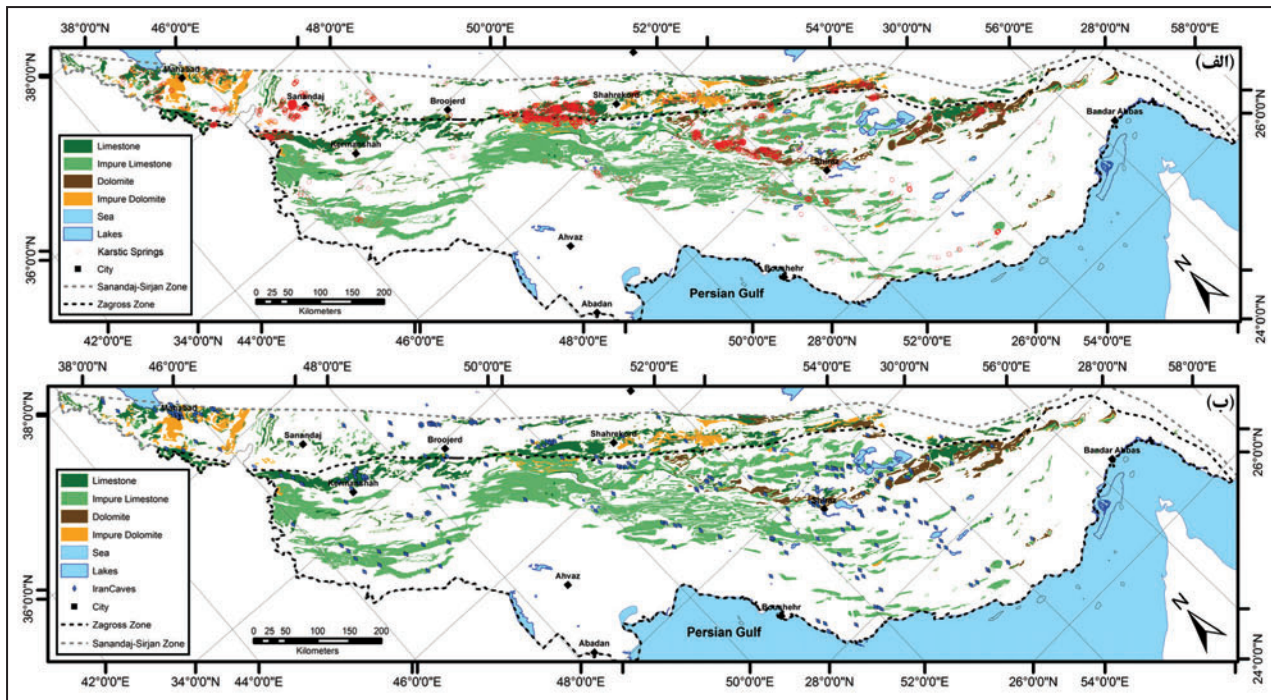
شکل ۸- نقشه رده‌بندی شده واحدهای کرناتی بر حسب الف) ستیرا؛ ب) گسل‌های اصلی و فرعی.



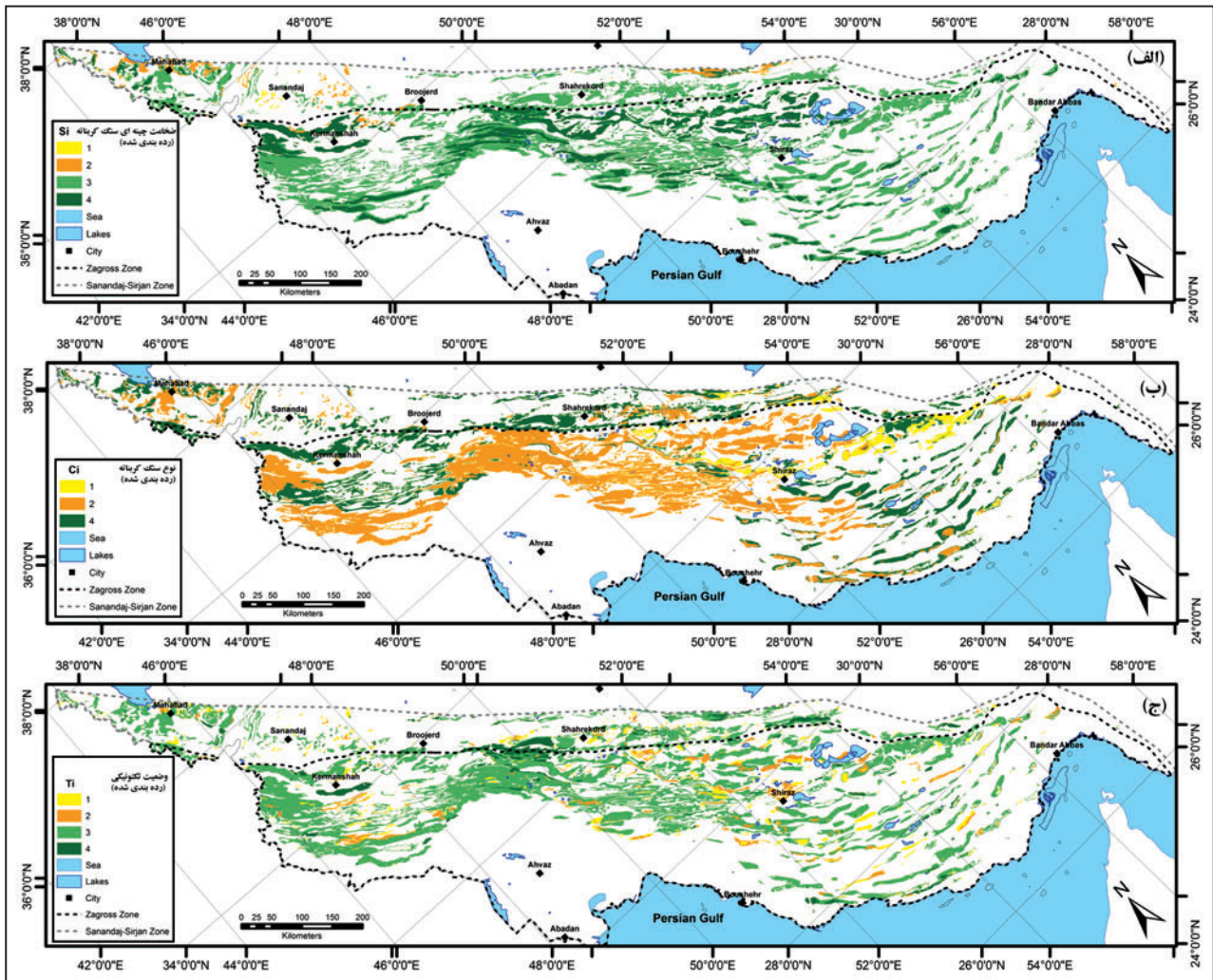
شکل ۹- الف) دمای میانگین سالانه و ب) بارش میانگین سالانه در محدوده مطالعاتی زاگرس (Jamab Consulting Engineers, 2000).



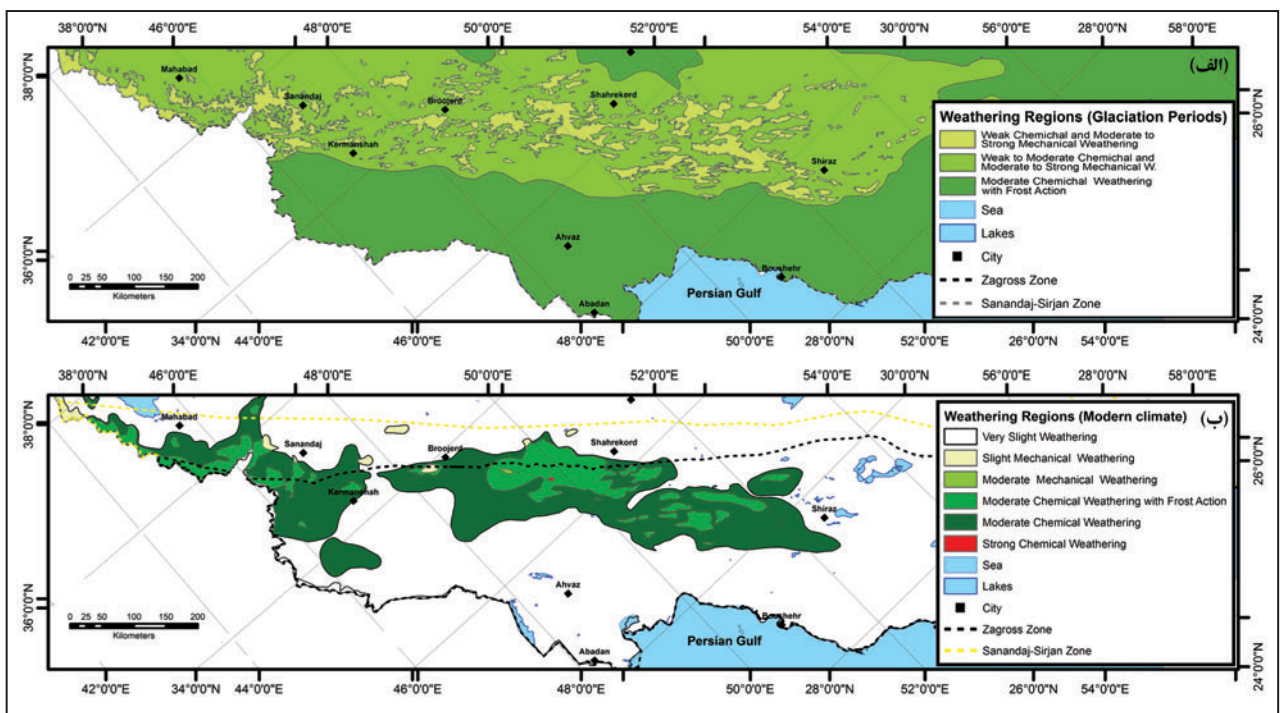
شکل ۱۰- الف) نواحی مورفوزنیک در طول دوره یخبجالی؛ ب) نقشه رقمی ارتفاعی زاگرس.



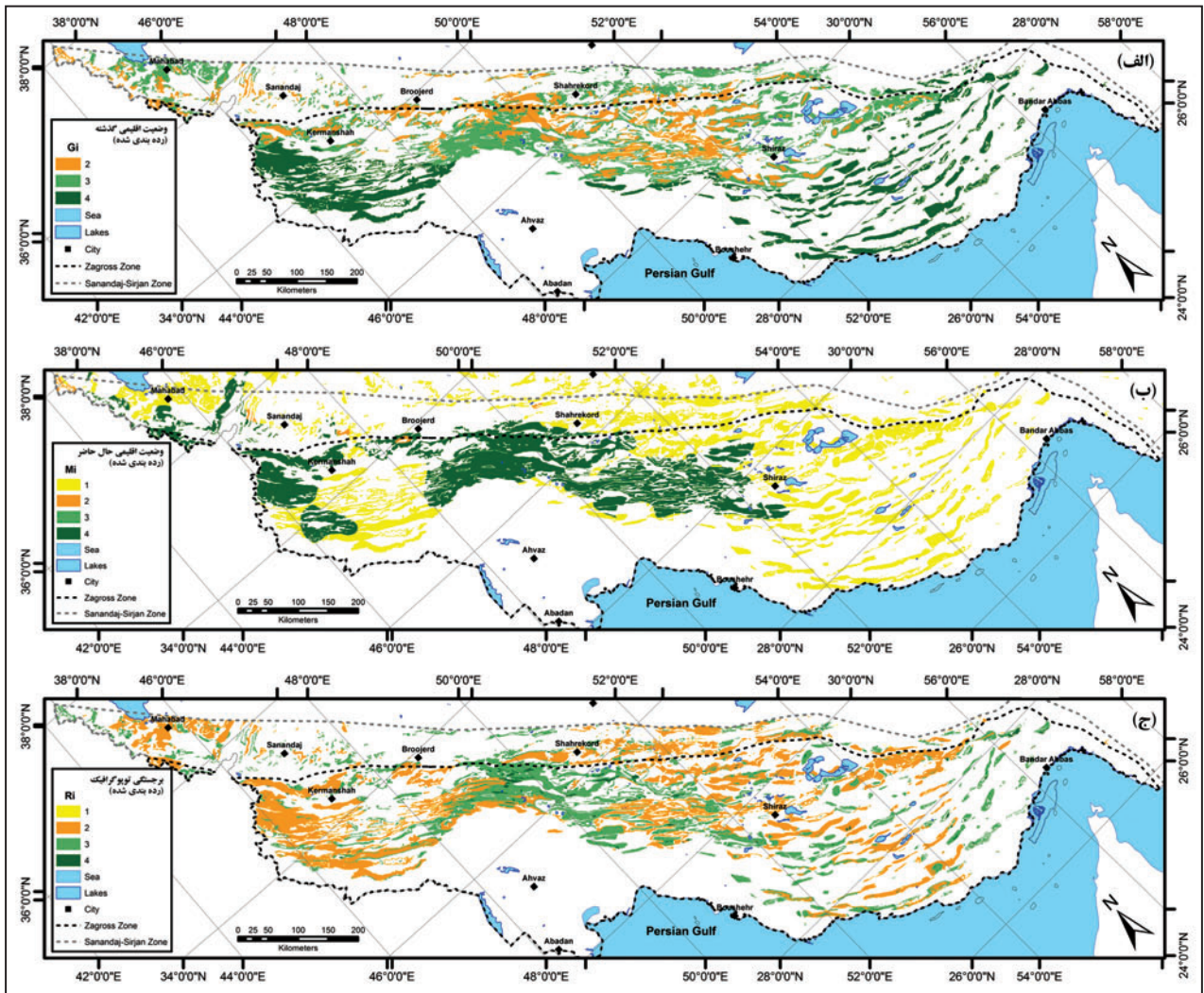
شکل ۱۱- الف) موقعیت چشمه‌های مهم کارستی و ب) غارهای کربناتی در منطقه مطالعاتی زاگرس.



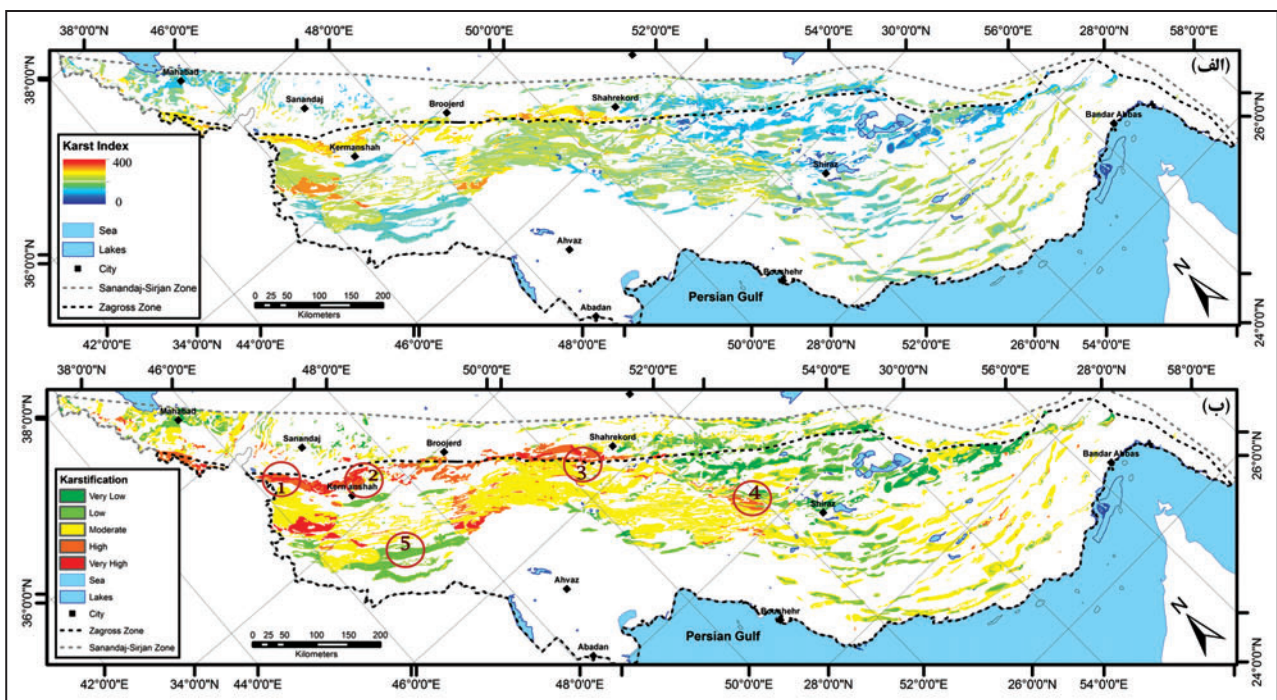
شکل ۱۲- الف) لایه‌های اطلاعاتی رده‌بندی شده ستبرای چینه‌شناسی واحدهای کربناتی (Sj)؛ ب) نوع واحدهای کربناتی (Ci)؛ و وضعیت زمین‌ساختی (Ti).



شکل ۱۳- نقشه پهنه‌بندی هوازدگی منطقه مطالعاتی در الف) شرایط اقلیمی حاضر؛ ب) دوره‌های یخبخالی.



شکل ۱۴- لایه‌های اطلاعاتی رده‌بندی شده اثر الف) اقلیم گذشته (Gi)؛ ب) اقلیم حال (Mi)؛ ج) برجستگی توپوگرافیک (Ri).



شکل ۱۵- نقشه شاخص گسترش کارست (Ki) و ب) نقشه توریک پتانسیل گسترش کارست در منطقه مطالعاتی زاگرس.

جدول ۱- برخی از مهم‌ترین واحدهای کربناتی در ایران به همراه توضیح مختصری از ستبرای و ویژگی‌های هر واحد.

سازند	سنگ‌شناسی	سن	میانگین ستبرای (m)*
جهرم	دولومیت خاکستری خاکستری رنگ	ائوسن	۴۶۷
الیکا	دولومیت ستبرالایه	تریاس آغازین تا میانی	۲۹۵
شتری	دولومیت زرد رنگ با لایه‌بندی خوب	تریاس آغازین تا میانی	۸۲۰
سورمه	آهک دولومیتی نازک‌لایه تا توده‌ای	تریاس آغازین تا میانی	۶۷۲
سبزار	دولومیت خاکستری تا سیاه	دوینین	۱۰۰
چهل کمان	آهک متوسط تا ستبرالایه	ائوسن	۳۵۰
آسماری	آهک کرمی تا قهوه‌ای	الیگوسن - میوسن	۳۱۴
تله زنگ	آهک فسیل‌دار توده‌ای قهوه‌ای تا خاکستری	پالئوسن - ائوسن	۱۷۶
زیارت	آهک ریفی	پالئوسن - ائوسن	۴۳۷
بیستون	آهک	تریاس - کرتاسه	۱۹۰۰-۸۰۰
اسفندیار	آهک ریفی توده‌ای	ژوراسیک	۱۰۰۰
دلیچای	آهک تا آهک ماری	ژوراسیک	۸۵
قلعه دختر	آهک ماسه‌ای و شیلی	ژوراسیک	۷۷۰
بادامو	آهک	ژوراسیک	۵۰
ایلام	آهک	کرتاسه بالایی	۱۹۰
کلات	آهک نازک‌لایه	کرتاسه پایانی	۱۴۰
لار	آهک نازک‌لایه تا توده‌ای خاکستری	ژوراسیک - کرتاسه	۳۵۰
مزدوران	آهک ستبرالایه خاکستری	ژوراسیک میانی تا پایانی	۵۰۰
سروک	آهک ستبرالایه تا توده‌ای خاکستری	کرتاسه پایانی	۸۲۰
نفت	آهک اوریتولین دار ستبرالایه تا توده‌ای خاکستری	کرتاسه آغازین	۳۳۴
تیرگان	آهک اوولیتی و بیو کلاستیک اوریتولین دار خاکستری	کرتاسه آغازین	۷۰۰
تیزکوه	آهک اوریتولین دار سفید تا صورتی ستبرالایه تا توده‌ای خاکستری	کرتاسه آغازین	۱۷۰
اقدار	آهک و دولومیت ستبرالایه تا توده‌ای خاکستری	کامبرین	۴۰۰
جمال	آهک ستبرالایه تا توده‌ای خاکستری به صورت بخش ریفی به همراه باندهای ضعیف دولومیتی	پرمن	۶۰
گوری	آهک	ترشیاری بالائی	۱۱۱
روته	آهک متوسط لایه خاکستری رنگ	پرمن	۷۰۰

*: ستبرای واحد کربناتی بر پایه (Stocklin (1977), Tehrani (1989) و Aghanabati (2004).

جدول ۲- رده‌بندی و امتیازدهی لایه‌های مختلف استفاده شده در محاسبه شاخص گسترش کارست (K_p).

متغیر	وزن	رده	ویژگی‌ها
M_i	$M_w = 2$	۱	هوازدهی خیلی کم
		۲	هوازدهی کم
		۳	هوازدهی مکانیکی متوسط
		۴	هوازدهی شیمیایی متوسط با عمل یخبندان تا هوازدهی شیمیایی متوسط تا قوی
G_i	$G_w = 2$	۲	هوازدهی شیمیایی ضعیف تا متوسط و هوازدهی مکانیکی متوسط
		۳	هوازدهی شیمیایی ضعیف تا متوسط و هوازدهی مکانیکی متوسط تا قوی (مجاور یخچالی)
		۴	هوازدهی شیمیایی متوسط با عمل یخبندان (شرایط فلوویال معتدل))
		۱	دولومیت ناخالص
C_i	$C_w = 3$	۲	دولومیت خالص
		۲	آهک ناخالص
		۴	آهک خالص
		۱	کمتر از ۵۰ متر
S_i	$S_w = 1$	۲	۵۱ تا ۱۰۰ متر
		۳	۱۰۱ تا ۵۰۰ متر
		۴	بیش از ۵۰۰ متر
		۱	کمتر از ۵۰ متر
T_i	$T_w = 1$	۲	۵۱ تا ۱۰۰ متر
		۳	۱۰۱ تا ۵۰۰ متر
		۴	بیش از ۵۰۰ متر
		۱	کمتر از ۰.۲٪
R_i	$R_w = 1$	۲	۰.۱ تا ۱.۰٪
		۳	۱.۰ تا ۳.۵٪
		۴	بیش از ۳.۵٪
		۱	کمتر از ۰.۲٪

جدول ۳- رده‌بندی مقدار (K) برای رده‌بندی نقشه شاخص گسترش کارست و تهیه نقشه تنوریک پتانسیل گسترش کارست.

تراکم چشمه‌ها (1/km ²) با دبی بیش از:			تعداد چشمه‌ها با دبی بیش از:			تراکم غار (1/km ²)	تعداد غارها	مساحت Km ²	رده کیفی پتانسیل گسترش کارست	محدوده Ki
۱۰ l/s	۲۵ l/s	۵۰ l/s	۱۰ l/s	۲۵ l/s	۵۰ l/s					
۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۰	۳۴	۱۵	۱۰	۰/۰۰۱۴	۱۴	۹۷۷۳	خیلی کم	۱۰۹ - ۰
۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۱	۹۵	۴۰	۲۸	۰/۰۰۲۰	۵۰	۲۴۴۳۹	کم	۱۶۶-۱۰۹
۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۱۳	۳۰۰	۱۲۰	۷۷	۰/۰۰۲۲	۱۳۲	۶۱۲۷۲	متوسط	۲۳۴-۱۶۷
۰/۰۱۱۱	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۲۲	۱۰۵	۹۲	۲۱	۰/۰۰۳۶	۳۴	۹۴۷۱	زیاد	۲۹۹-۲۳۵
۰/۰۱۳۱	۰/۰۱۱۰	۰/۰۰۲۸	۵۷	۴۸	۱۲	۰/۰۰۳۹	۱۷	۴۳۵۸	خیلی زیاد	۴۰۰-۳۰۰
-	-	-	۵۹۱	۳۱۵	۱۴۸	-	۲۴۷	۱۰۹۳۱۳	مجموع	

کتابنگاری

مؤسسه تحقیقات آب کشور (مرکز ملی تحقیقات و مطالعات سازندهای سخت)، چاپ نشده- چشمه‌های کارستی کشور. مهندسین مشاور جاماب، ۱۳۷۹- مطالعات جامع آب کشور (گزارش هواشناسی و اقلیم شناسی).

References

- Aghanabati, A., 2004- Geology of Iran. Publications of Geological survey of Iran, Iran.
- Berberian, M. & King, C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran., Canadian Jour. Of Earth Sci. Vol. 18, No. 2.
- Berberian, M., 1976- Seismotectonic map of Iran, 1:2,500,000 scale. Publications of Geological Survey of Iran, Iran.
- Bobek, H., 1959- Future and Formation of the Grate Kawir and Masileh, Arid Zone Research Center, University of Tehran.
- Bobek, H., 1963- Die Rolle der Eiszeit in Nordwestiran. Z. Gletscherk. 25, 130-183.
- Bonham-Carter, G. F., 1994- Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Pergamon Press, Oxford.
- Bronger, A., 2003- Correlation of loss-paleosol sequences in East and Central Asia with SE Central Europe: towards a continental Quaternary pedomstratigraphy and paleoclimatic history. Quat. 106/107, 11-21.
- Busche, D., Sarvati, R. & Siefker, U., 2002- Kuh-e-Namak Reliefgeschichte eines Salzdoms im abflusslosen zentraliranischen Hochland. Petemanns Geogr., Mitt., 146, 68-77.
- Dodonov, A. E., 1991- Loess of Central Asia. Geo Journal 24, 185-194.
- Dumas, D., 1998- Karsts du Zagros (Iran), Bilans Hydrologiques et evolution geomorphologique. PhD. Thesis, University Louis. Pasteur.
- Ebrahimi, B., Pasandi, M. & Ahmadipour, M. R., 2007- Hydrodynamic behavior of Karstic aquifers in Broujerd, western Iran, Hydrol. Sci. J. 52(1):192-205.
- Edgell, H. S., 1998- Karst water resources in Zardkouh (Kouhrang Region, South West of Iran). In: Proceeding of 2nd international symposium on karst water resources, Tehran, Iran.
- Eftekharneshad, J., 1973- Some aspects about plate tectonics in relation to sedimentary basin in East Iran. Tehran Technical Faculty. pp 218 - 227.
- Ford, D. C. & Williams, P., 2007- Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons, Ltd, pp. 562.
- Grunert, J., 1977- Jungpleistozane Tal-und Hangentwicklung im Shir-Kuh massiv, Zentral-Iran. Karlsruher Geogr. Hefte 8, 42-62.
- James, G. A. & Wynd, J. G., 1965- Stratigraphic nomenclature of Iranian Oil Consortium Agreement area. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 49 (12), pp. 21812-2245.
- Japan & US ASTER Science Team, 2009- ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM), Earth Remote Sensing Data Analysis Center , <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>.
- Javanshad, A., 1995- Caves, Enteshar publication, p. 286.
- Kehl, M., 2009- Quaternary climate change in Iran- The state of knowledge, erdkunde, No. 16. No.1. pp. 1-17.
- Kehl, M., Frenchen, M. & Skowronek, A., 2005- Paleosols derived from loess and loess-like sediments in the basin of Persepolis, Southern Iran. In: Quat. Int. 140/141, 135-149.
- Maghsoodi, M., Karimi, H., Safari, F. & Chaharrahi, Z., 2009- Karst development evaluation in Kermanshah Parav: Bistoun massif using recession coefficient, spring death time and chemical and isotope analysis. Phys Geogr Res Q, No 69.
- Minooei, A., Karami, G. & Omid, P., 2010- Hydrogeological and Hydro chemical behaviors of Glooz and Neloksan Springs in Shahoo Mountain. In: Proceeding of the first Iranian National Conference on applied research in water Resources, 11-13 May, Kermanshah, Iran.
- Mohmudi, F., 1988- L' evolution des reliefs pendant le Quaternaire en Iran. Researches in Geography. 23(20), 5-43.
- Nabavi, M. H., 1976- An introduction to geology of Iran. , Publications of Geological Survey of Iran, Iran.

- Nogole Sadat, M. A. & Almasian, M., 1993- Tectonic map of Iran, 1:1,000,000 scale. Publications of Geological Survey of Iran, Iran.
- Palmer, A. N., 2007- Cave Geology, Cave Books, Dayton, Ohio, pp. 454.
- Pedrami, M., 1982- Pleistocene and Paleo Climate in Iran. Geo, 1, Surv, Tehran.
- Peltier, L. C., 1950- The geographic cycle in perglacial regions as it is related to climatic geomorphology. Ann. Assoc. Amer. Geogr., 40.
- Raeisi, E. & Karami, Gh., 1997- Hydrochemographs of Berghan karst spring as indicators of aquifer characteristics. J Cave Karst Stud 59(3):112-118.
- Raeisi, E. & Kowsar, N., 1997- Development of Shahpour cave, Southern Iran. Cave and Karst Science, 24(1), 27-34.
- Raeisi, E. & Laumans, M., 2009- Iran cave directory. Berliner Höhlenkundliche Berichte, No. 37, (2nd Edition), http://www.speleo-berlin.de/d_publicationen.php.
- Raeisi, E., 2002- Carbonate karst caves in Iran. Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation, 339 – 344, Ljubljana-Postojna .
- Rutter, N. W., Rokosh, D., Evans, M. E., Little, E. C., Chlachula, J. & Velichko, A. A., 2003- Correlation and interpretation of Paleosols across European Russia and Asia over the last interglacial-glacial cycle. Quat. Res. 60, 101-109.
- Salahi, M., 2008- Caves of Iran, Nashreny publication, p.224, ISBN 964-312-961-6.
- Sayarinezhad, M. & Naghibian, R., 1998- Characterstics of karstic system in southern flank of Ravandy Anticline. In: Proceeding of 2nd international symposium on karst water resources, Tehran, Iran.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics map of Iran: A review. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 52 (7), pp.1229-1258.
- Stocklin, J., 1977- Stratigraphic Lexicon of Iran. Publications of Geological Survey of Iran, Report no. 18, Iran.
- Tehrani, Kh., 1989- Stratigraphy of Iran. Tehran University Publication, Tehran, p 342.
- Thomas, D. S. G., Bateman, M. D., Mehrshahi, D. & O'Hara, S. L., 1997- Development and environmental significance of an aeolian sand ramp of last glacial age, Central Iran. In: Quat. Res. 48, 155-161.
- White, B. W., 1988- Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains, Oxford University Press, pp. 464
- Yamani, M., Jedar Eyvazi, J. & Gorabi, A., 2007- The geomorphological traces of glaciers boundaries in Karkas mountain, Tehran University, Iran.
- Zamani, H., 2009- The evidences and the terminuses of Quaternary glaciers in the central Alborz Mountain, PhD. Thesis, University of Tehran, Iran.

Using GIS for evaluation of potential karstification in carbonate rocks in Zagros based on the hydrogeological and climatological factors

B. Ebrahimi¹ & A. Seif^{2*}

¹ Ph.D., Isfahan Regional Water Company, Isfahan, Iran

² Associate Professor, Department of Natural Geography, Faculty of Geographic Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Received: 2012 July 29

Accepted: 2015 September 20

Abstract

This study has been carried out with the aim of mapping karst and evaluation of potential karstification of carbonates rocks in Zagros. One objective of this paper is a spatial evaluation of karst development in Zagros considering role of the chief factors affecting karst development. The main considered factors are those classified by White (1988) into three driving forces (i.e., chemical driving force, physical driving force and hydrogeological setting). Precipitation, temperature, relief, rock type, tectonic setting and stratigraphic thickness of soluble carbonate rocks are the main factors classified to describe the mentioned driving forces. In this study, precipitation and temperature are represented by the chemical weathering conditions during the modern and glacial periods prepared on the basis of Peltier's graphs. All data are mapped, classified, weighted and managed in separate layers in GIS environment. The Karst Index (K_i) is introduced to define the modeled degree of karstification computed by proper combination of six weighted layers and the final theoretical karst map of Iran is prepared based on the ranked Karst Index. According to the combination method, values of K_i could be in a range of zero to 400. The classified theoretical karst map shows that out of 109,313 km² of carbonate units (25 % of the surface area of the study area) about 34212 km² (31.3% of carbonate rocks) have very low to low potentials for development of karstic features. About 61272 km² (56% of carbonate rocks) have moderate potential and about 13829 km² (12.7% of carbonate rocks) have high to very high potentials for karstification. In other words, 68.7% of the carbonate rocks are carbonate rocks with moderate to high potentials for karstification. Densities of caves and karstic springs are the main and the most important geomorphological features used to check the calculated degree of karstification. For this purpose, complete inventories of caves and springs in Zagros were made. 64 caves and 129 springs (with discharges above 10 l/s) occur in rocks in areas of very low to low potentials for karstification. About 132 caves and 300 springs fall in the moderate class and 51 caves and 162 springs in areas with high to very high potentials for karstification. Cave densities are 0.0014, 0.0020, 0.0022, 0.0036 and 0.0039 caves per square kilometers for very low, low, moderate, high and very high classes respectively. In addition, densities of springs are 0.0035, 0.0039, 0.0049, 0.0111 and 0.0131 springs per square kilometers for very low, low, moderate, high and very high classes respectively. In other words, densities of caves and springs show a good correlation with the evaluated karstification.

Keywords: Hydrogeological setting, Chemical and physical driving forces, Karst Index, Cave, Karst, Zagros.

For Persian Version see pages 333 to 348

*Corresponding author: A. Seif; E-mail: abdsafe@yahoo.com