

پهنه‌بندی تحوّل و حسّاسیت کارست با استفاده از مدل رگرسیون خطّی چندمتغیره در منطقه‌ی کارستی شاهو

محمدصدیق قربانی* - استادیار گروه جغرافیا، دانشکده‌ی اقتصاد و علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور
محمد اونق - دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه بنارس هندوستان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۸/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۰/۱۱/۵

چکیده

فرایند تحوّل کارست، فرایندی پیچیده و متأثر از متغیرهای مختلف است. با توجه به حسّاسیت ذاتی سیستم کارست، امروزه در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مناطق کارستی تلاش بر این است که میزان تحوّل و حسّاسیت کارست در چهارچوب مدل یا مدل‌هایی مناسب مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه منطقه‌ی کارستی شاهو، به‌عنوان منطقه‌ی شاخص کارستی در زاگرس شمال‌غربی برای پهنه‌بندی تحوّل و حسّاسیت کارست با استفاده از مدل رگرسیون خطّی چندمتغیره مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌های اطلاعاتی و نقشه‌های رستری تهیه شده در محیط (GIS) شامل سنگ‌شناسی، میزان فاصله از گسل، شیب، ارتفاع و جهت دامنه، به‌عنوان متغیرهای مستقل (پیشگویی‌کننده) و لایه‌ی اطلاعاتی فروچاله‌ها به‌عنوان متغیر وابسته، پس از پردازش‌های لازم نرم‌افزاری وارد مدل رگرسیونی چندمتغیره شده‌اند. نتایج حاصل از معادله‌ی رگرسیونی یا به‌گفته‌ای، نتیجه‌ی حاصل از تأثیر دادن ضرایب رگرسیونی متغیرها در ماتریس داده‌ها بر اساس روابطی (استعداد وقوع فروچاله‌ها)، به‌صورت طیفی از اعداد مثبت و منفی درآمده است. اعداد مثبت بیانگر وجود شرایط لازم برای توسعه‌ی کارست و اعداد منفی بیانگر نبودن شرایط مناسب برای توسعه‌ی کارست است. دامنه‌ی این طیف عددی، به‌صورت کیفی به پنج کلاس از استعداد بسیار زیاد تا بسیار کم تقسیم شده است و در قالب جدول و نقشه‌ی استعداد توسعه‌ی کارست برای منطقه مطالعاتی ارائه شده است. درنهایت، بر اساس نقشه‌های استعداد توسعه‌ی کارست، نقشه‌ی حسّاسیت کارست در سه کلاس حسّاسیت زیاد، حسّاسیت متوسط و حسّاسیت کم ارائه شده است. هم‌خوانی بالای نقشه‌ها و نتایج حاصله با واقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه، گویای کارایی و قابلیت اعتماد مدل است.

کلیدواژه‌ها: شاهو، کارست، فروچاله، مدل رگرسیونی، پهنه‌بندی.

مقدمه

مناطق گسترده‌ای از سرزمین‌های خشک و غیربخچالی سیاره‌ی زمین با سازندهای کربناته مستعد کارست پوشیده شده و کمابیش ۲۰ تا ۲۵ درصد جمعیت کره‌ی زمین، بیشتر یا به‌طور کلی زندگیشان به منابع آب کارست وابسته است (Ford and Williams, ۲۰۰۷). تشکیلات کربناته کارستی حدود ۱۱ درصد از مساحت ایران را می‌پوشاند (رئیس‌ی، ۲۰۰۲: ۳۴۰). در زاگرس حدود ۹۰ درصد از سنگ‌ها را سنگ‌های کربناته تشکیل می‌دهد (افراسیابیان، ۱۳۷۷). با توجه به وسعت زیاد سازندهای کربناته در ایران و اهمیت آن از جنبه‌های مختلف (فرهنگی، اقتصادی، علمی و...) به‌ویژه از نظر تأمین منابع آب، انجام هر پژوهشی در این زمینه ضروری است.

در مناطق کارستی، آب جمع‌شده در حفره‌های بسته‌ی کارستی یا فروچاله‌ها از راه چاه‌های فروکش به‌طور مستقیم به مجراهای زیرزمینی نفوذ می‌کند. این آب با گذشتن از خاک و پوشش‌های حفاظتی آلوده‌ی دیگر، بدون هیچ تصفیه‌ای در زمانی کوتاه وارد آبخوان‌های کارستی می‌شود. مورفولوژی کارست نقش مهمی در ارزیابی حساسیت آبخوان‌های کارستی دارد (Plan et al, ۲۰۰۳).

یکی از جنبه‌های پژوهشی سیستم کارست که می‌توان گفت تا کنون در ایران به آن پرداخته نشده است، بررسی حساسیت سیستم کارست^۱ و تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت کارست است. حساسیت سیستم کارست از دو دیدگاه، یکی آلودگی منابع آب کارست از راه دخل و تصرف انسان در حوضه‌ی آبریز چشمه‌های کارستی، به‌ویژه در کارست‌های مرتفع و دیگری انجام پهنه‌بندی خطر از نظر احداث تأسیسات و زیرساخت‌های انسانی، بررسی می‌شود. بیشتر تعاریف ارائه شده برای حساسیت کارست، پیرامون ویژگی‌های زمین‌شناختی، ژئومورفولوژیکی، هیدروژئولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و... سیستم کارست از یک سو و آلودگی منابع آب کارست با فعالیت‌های انسان از سوی دیگر است. در همین راستا، گروه مطالعاتی کوست ۶۲۰^۲ (۱۹۹۷) که حساسیت کارست را با بهره‌گیری از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی مطالعه کرده‌اند، دو گونه حساسیت ذاتی و حساسیت ویژه برای سیستم کارست قائل شده‌اند. "حساسیت ذاتی اصطلاحی است که برای تعریف حساسیت آب زیرزمینی به آلاینده‌های حاصل از فعالیت‌های انسانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اصطلاح ویژگی‌های ذاتی زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی یک منطقه را دربرمی‌گیرد، اما از ماهیت فعالیت‌های انسانی جداست" و "حساسیت ویژه اصطلاحی است که برای تعریف حساسیت آب زیرزمینی به یک آلاینده‌ی ویژه یا گروهی از آلاینده‌ها به کار می‌رود. این اصطلاح ویژگی‌های آلاینده‌ها و ارتباط آنها را با مؤلفه‌های گوناگون حساسیت ذاتی دربرمی‌گیرد". تا کنون مدل‌ها و روش‌های مختلفی از سوی سازمان‌ها و گروه‌های پژوهشی برای بررسی حساسیت کارست ارائه شده است. بیشتر این مدل‌ها وضعیت پوشش سطحی زمین (لیتولوژی، ضخامت خاک، ضخامت اپی کارست، فروچاله‌های کارستی و...) را به‌عنوان یک عامل مهم و مؤثر در میزان حساسیت کارست برشمرده‌اند و بر همین اساس نیز به تهیه‌ی نقشه‌های خطر و حساسیت کارست اقدام کرده‌اند. ویژگی‌ها، مزایا و معایب این روش‌ها و مدل‌ها را

۱. Karst Vulnerability or Karst Sensitivity

۲. COST ۶۲۰ (European Cooperation in the Field of scientific and Technical Research)

لیلاند و همکاران^۱ (۲۰۰۸) مورد بررسی قرار داده‌اند.

نقشه‌های حساسیت براساس شرایط هیدروژئولوژیکی، برای نمایش مناطقی طراحی می‌شوند که بیشترین استعداد را برای آلودگی منابع آب و آثار انسانی دارند. برخی از کشورها از نقشه‌های حساسیت به‌عنوان یک مبنای برای منطقه‌بندی‌های حفاظتی استفاده می‌کنند.

نقشه‌های حساسیت، طرح‌های ساده‌ای از شرایط طبیعی هستند که قابلیت اطمینان آنها بسته به در دسترس بودن، کیفیت و تفسیر داده‌هاست (Ravber and Goldschieder, ۲۰۰۹: ۴۰۶). هدف نقشه‌های حساسیت، به‌ویژه در ارتباط با منابع آب زیرزمینی، مشخص کردن مناطق بسیار حساس و اولویت‌بندی آنهاست. یک نقشه‌ی حساسیت ممکن است به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا به شیوه‌ی علمی، توازن بین بنیادین حفاظت از منابع آب زیرزمینی و جنبه‌های مختلف اجتماعی - اقتصادی بیابد (Goldschieder, ۲۰۰۵: ۵۵۶).

به‌دلیل ماهیت پیچیده‌ی سیستم کارست، به‌ویژه از دیدگاه ژئومورفولوژی، تا کنون مدلی ارائه نشده است که بتوان براساس آن، تمام جوانب این سیستم را بررسی کرد. در سال‌های گذشته مدل‌های چندی برای بررسی سیستم کارست، همچون مدل رگرسیونی چند متغیره، مدل رگرسیونی لجستیک، مدل کای‌دو، روش سلسله‌مراتبی، روش ارزش اطلاعاتی و... که در واقع بیشتر آنها روش‌های آماری هستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این میان می‌توان به استفاده از روش‌های رگرسیونی هایلند و همکاران^۲ (۲۰۰۶) برای بررسی قابلیت تشکیل فروچاله‌ها با به‌کارگیری از چهار عامل سنگ‌شناسی، عمق خاک، میزان فاصله از گسل و میزان فاصله از رودخانه، استفاده از مدل رگرسیون لجستیک لاملاس و همکاران^۳ (۲۰۰۷) برای بررسی احتمال وقوع و تشکیل فروچاله‌های کارستی، استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره غلامی و همکاران (۲۰۰۸) برای بررسی چشمه‌های کارستی و آبرفتی در البرز مرکزی و همچنین به‌کارگیری از روش‌های کای‌دو، سلسله‌مراتبی، ارزش اطلاعاتی و... ملکی و شوهانی (۱۳۸۶) برای پهنه‌بندی تحول کارست اشاره کرد. در این پژوهش از میان مدل‌های موجود، مدل رگرسیون خطی چندمتغیره انتخاب شد؛ زیرا این مدل قابلیت پیش‌بینی داشته و می‌تواند به‌طور هم‌زمان میزان تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته را ارزیابی کند، همچنین هدف از استفاده‌ی این روش، شناسایی مناطق مستعد برای تحول کارست است و از نتایجی که به‌دست خواهد آمد، نقشه‌ی حساسیت استخراج خواهد شد.

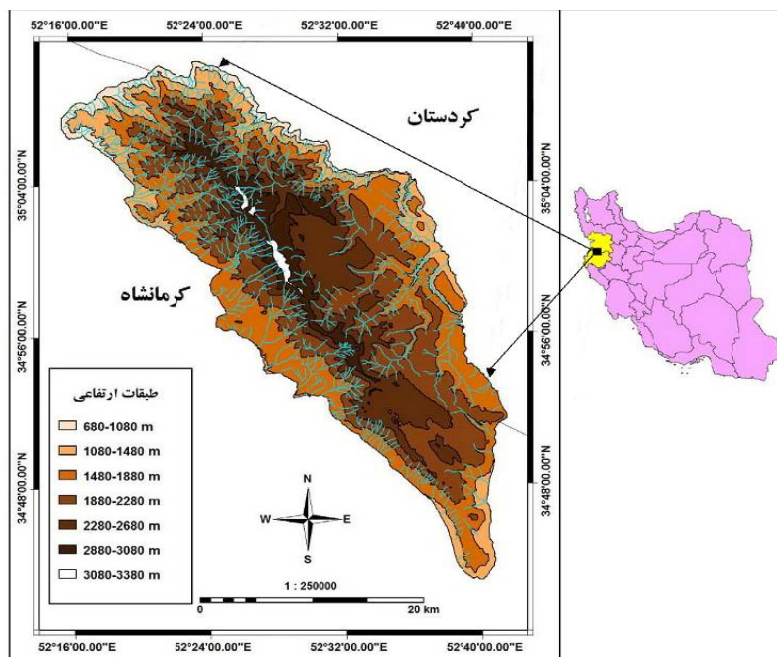
موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی

منطقه‌ی کارستی شاهو در زاگرس شمال‌غربی واقع شده است. بخش عمده‌ی این منطقه‌ی کارستی، شامل یک توده‌ی کوهستانی آهکی با ضخامت زیاد است که سن آهک‌های آن به کرتاسه برمی‌گردد و با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی در فاصله‌ی میان استان‌های کردستان و کرمانشاه قرار گرفته است (شکل شماره ۱).

۱. Leyland et al

۲. Hyland et al

۳. Lamelas et al



شکل ۱. موقعیت منطقه‌ی کارستی شاهو

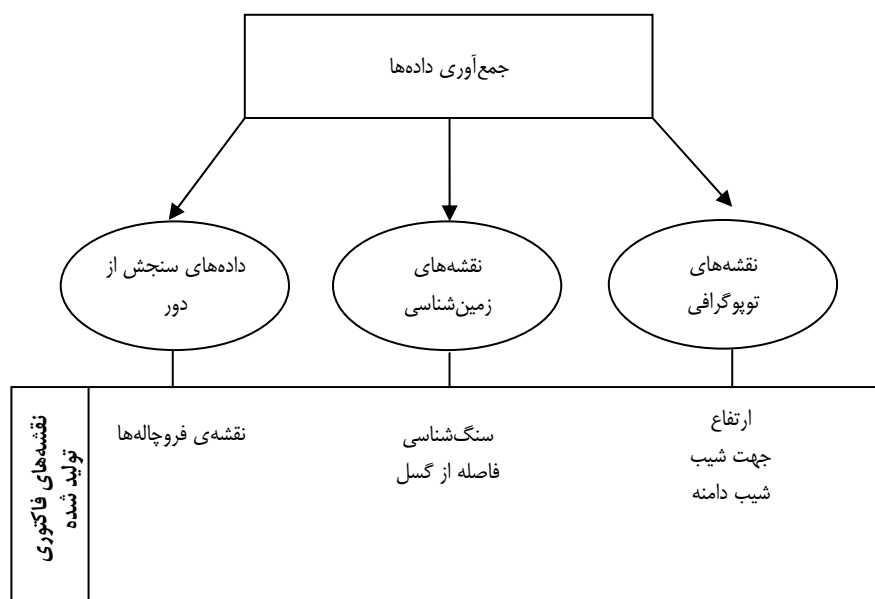
شهرهای پاوه و روانسر در دامنه‌ی جنوبی این ناهمواری قرار گرفته‌اند. مساحت تقریبی محدوده‌ی مورد بررسی، حدود ۷۹۳ کیلومترمربع است که بین عرض‌های شمالی $34^{\circ} 42' 47''$ تا $35^{\circ} 7' 5''$ و طول‌های شرقی $46^{\circ} 23' 29''$ تا $46^{\circ} 40' 50''$ واقع شده است.

داده‌ها و روش

در این بررسی برای تحلیل روابط بین متغیرهای مؤثر (مستقل) بر تحول کارست (وابسته) مدل رگرسیون خطی چندمتغیره به کار رفته است. آماده‌سازی لایه‌های مختلف اطلاعاتی در محیط GIS انجام شده و سپس داده‌ها برای تحلیل و اجرای مدل، وارد محیط SPSS شده‌اند.

ابزارهای مورد استفاده در این بررسی عبارت‌اند از:

- نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که برای تهیه‌ی لایه‌های شیب، جهت دامنه، ارتفاع، سنگ‌شناسی و عوامل ساختاری رقومی گشته‌اند (شکل شماره ۲)؛
- تصاویر ماهواره‌ای پانکروماتیک IRS با قدرت تفکیک ۵ متر (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح) برای بررسی فروچاله‌های کارستی منطقه‌ی شاهو؛
- استفاده از نرم‌افزارهای GIS (شامل نرم‌افزارهای ILWIS ۳.۳۱ و Arc View ۳.۱ برای تهیه و تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی و استخراج نقشه‌های نهایی) و نرم‌افزار SPSS ۱۱.۵ برای تحلیل داده‌ها و اجرای مدل و استفاده از ابزارهایی همچون GPS، قطب نما و دوربین عکاسی در بررسی‌های میدانی.



شکل ۲. فرآیند جمع‌آوری داده‌ها و تولید نقشه‌های عاملی

آماده‌سازی لایه‌ها

برای اجرای مدل رگرسیونی مراحل مختلفی پشت سر گذاشته شده است (شکل شماره ۳). در ابتدا لایه‌های اطلاعاتی سنگ‌شناسی، میزان فاصله از گسل، شیب، ارتفاع و جهت دامنه، به‌عنوان متغیرهای مستقل (پیشگویی‌کننده) و لایه‌ی اطلاعاتی فروچاله‌ها، به‌عنوان متغیر وابسته انتخاب شدند. در محیط نرم‌افزار ILWIS ۳.۳۱ تمام لایه‌های مربوط به متغیرها به‌صورت رستری و با ژئورفرنس یکسان استخراج شدند که در این حالت تمام پیکسل‌ها در لایه‌های اطلاعاتی، دارای اندازه و ارزش ویژه‌ی خود شدند. با توجه به وسعت زیاد منطقه‌ی شاهو و تعداد بسیار زیاد پیکسل‌ها، براساس ژئورفرنس اولیه با اندازه‌ی پیکسل‌های کوچک، برای کاهش هزینه‌ی زمان در دوره‌های محاسبه برای منطقه‌ی شاهو، از ژئورفرنسی با اندازه‌ی پیکسل‌های ۲۵۰ متر استفاده شده است. در این حالت تعداد رکوردهای موجود در منطقه‌ی شاهو برای هر لایه‌ی اطلاعاتی برابر با اندازه‌ی پیکسل ۲۵۰ متر، ۱۲۷۸۳ رکورد بوده است. بنابراین تمام لایه‌های اطلاعاتی در منطقه، اندازه‌ی پیکسل‌های برابر دارند. در میان متغیرهای مستقل، لایه‌ی کیفی سنگ‌شناسی، به‌ترتیب میزان اهمیت هر سازند با اعمال وزن (۱ تا ۵) تبدیل به یک لایه‌ی کمی شده است؛ بدین معنی که سازندی که بیشترین اهمیت را داشته ارزش ۵ و سازندی که کمترین اهمیت را داشته ارزش ۱ گرفته است؛ اما از آنجاکه لایه‌های دیگر مربوط به متغیرهای مستقل (شیب، فاصله از گسل، ارتفاع و جهت دامنه) خود دارای ارزش کمی بودند، در آنها تغییری انجام نگرفته است. لایه‌ی کیفی متغیر وابسته (لایه‌ی فروچاله‌ها) نیز با تبدیل به نقشه‌ی ۰ و ۱ به لایه‌ی کمی تبدیل شده است. بنابراین مناطقی که فروچاله‌ها در آن شکل گرفته‌اند، ارزش ۱ و قسمت‌های دیگر که فروچاله ندارند ارزش ۰ گرفته‌اند. درنهایت تمام لایه‌های اطلاعاتی، شامل لایه‌های مربوط به متغیرهای مستقل و لایه‌ی مربوط به متغیر وابسته برای اجرای مدل رگرسیونی، از محیط GIS به محیط نرم‌افزار SPSS ۱۱.۵ منتقل شدند.

روش گام به گام^۱

پس از ورود لایه‌ها به محیط نرم‌افزار SPSS، در میان روش‌های موجود برای ورود داده‌ها به معادله، روش گام به گام که متداول‌ترین روش شمرده می‌شود، انتخاب شده است. در این روش متغیرهای پیشگویی‌کننده (مستقل) تک به تک به معادله اضافه می‌شود و به دنبال آن اگر نقش معناداری در رگرسیون نداشته باشد، از آن حذف می‌شود (کینیر و گری^۲، ۱۳۸۱: ۳۴۷). در بحث‌های آماری، سطح معناداری (p-value) ۵ درصد تنظیم شده است. بنابراین چنانچه این سطح، برای متغیری بیش از ۵ درصد باشد، متغیر مورد نظر معنادار نبوده و از معادله حذف می‌شود. در معادله متغیرهایی باقی می‌مانند که سطح معناداری آنها ۵ درصد و کمتر باشد.

در نهایت، پس از ورود پنج متغیر سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، شیب، جهت دامنه و ارتفاع به‌عنوان متغیرهای مستقل و متغیر فروچاله‌ها به‌عنوان متغیر وابسته برای به‌دست آوردن معادله رگرسیون، نتایج زیر به‌دست آمد.

– متغیرهای فاصله از گسل و جهت دامنه، به دلیل همبستگی پایین و سطح معناداری بیش از ۵ درصد از معادله حذف گردیدند. این بدان معناست که در منطقه‌ی شاهو درصد زیادی از فروچاله‌ها با فاصله‌ی زیاد از خطوط گسل شکل گرفته‌اند. دلیل آن اینکه در محاسبه، میزان همبستگی تنها در ارتباط با خط گسل در نظر گرفته شده است و همچنین جهت دامنه تأثیر زیادی بر شکل‌گیری فروچاله‌ها نداشته است.

– میزان اهمیت هر متغیر در معادله بر اساس ضریب استاندارد بتا (Beta) تعیین می‌شود. ضریب بتا نشان‌دهنده‌ی میزان تغییر متغیر وابسته (بر اساس واحد انحراف معیار) به‌ازای تغییری به‌اندازه‌ی یک انحراف معیار در متغیر مستقل است (همان، ۳۴۱). هرچه میزان این ضریب برای هر متغیر بزرگتر باشد، به مفهوم همبستگی بیشتر و اهمیت بیشتر آن متغیر است. همچنین ضریب منفی بتا بدین معناست که متغیر مستقل به‌صورت معکوس بر متغیر وابسته تأثیر دارد. برای نمونه، متغیر شیب هرچه کمتر باشد تأثیر بیشتری بر متغیر وابسته (شکل‌گیری فروچاله‌ها) دارد و ضریب بتای آن نیز منفی است. در منطقه‌ی شاهو به‌ترتیب، متغیرهای شیب (با ضریب بتا $-0/283$)، ارتفاع (با ضریب بتا $0/149$) و سنگ‌شناسی (با ضریب بتا $0/147$) اهمیت دارند.

– در نهایت با توجه به ضرایب رگرسیونی به‌دست آمده B (ضریب رگرسیونی ثابت و ضریب رگرسیونی هر متغیر) که از آن با عنوان ضریب استاندارد نشده هم نام برده می‌شود، معادله‌ی احتمال شکل‌گیری فروچاله‌ها برای منطقه‌ی شاهو به‌دست آمد. ضریب ثابت رگرسیونی برای منطقه‌ی شاهو که به معادله افزوده خواهد شد، مقدار $-0/064$ است و ضریب رگرسیونی متغیرهای شیب، ارتفاع و سنگ‌شناسی به‌ترتیب برابر با مقادیر $-0/0055$ ، $0/0007$ و $0/024$ است. بنابراین معادله‌ی احتمال وقوع فروچاله‌ها برای منطقه‌ی شاهو به‌صورت زیر برآورد شده است.

$$\text{سنگ شناسی} (0/024 \times) + (\text{ارتفاع} \times 0/0007) + (\text{شیب} \times -0/0055) + (-0/064) = \text{استعداد وقوع فروچاله‌ها}$$

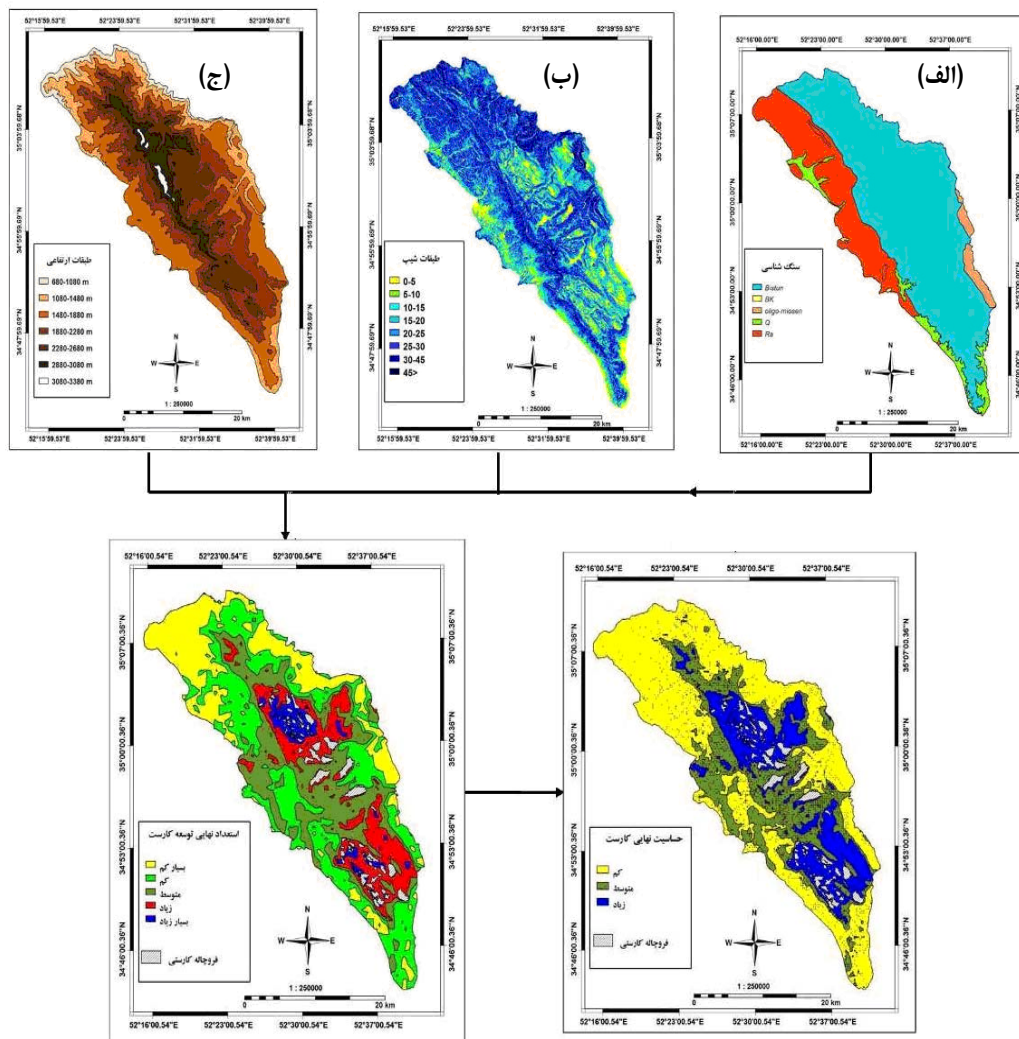
با توجه به مدل آماده شده برای منطقه، ضرایب به‌دست آمده در ماتریس داده‌ها تأثیر کرده و معادله برای هر یک از

۱. Stepwise Method

۲. Kinnear & Gary

۱۳۷۸۳ شبکه‌ی نمونه‌ی موجود، محاسبه شده و ستون جواب معادله برای تجزیه و تحلیل در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و تهیه‌ی نقشه‌ی احتمال نهایی وقوع فروچاله‌ها، وارد محیط نرم‌افزاری ۳.۳۱ ILWIS شده است. داده‌های ورودی پس از میان‌یابی، تبدیل به نقشه‌ی اولیه‌ی احتمال وقوع فروچاله‌ها شده است. خروجی نهایی نیز در محیط ۳.۳۱ ILWIS گرفته شده است.

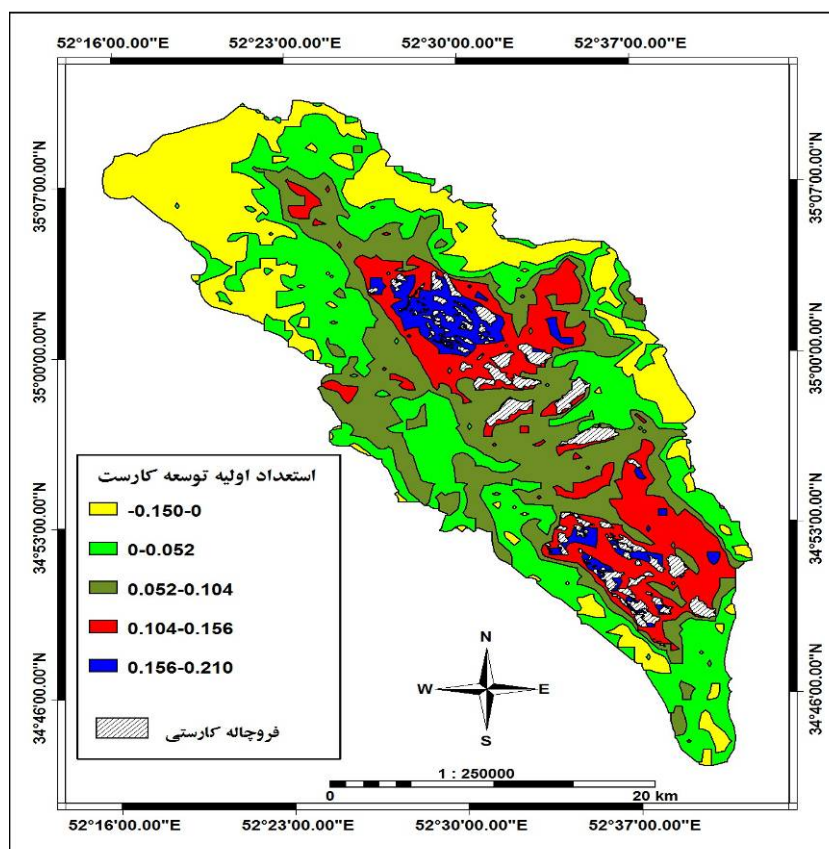
نتایج حاصل از معادله‌ی رگرسیونی یا به‌گفته‌ای، نتیجه‌ی حاصل از تأثیر دادن ضرایب رگرسیونی متغیرها در ماتریس داده‌ها بر اساس روابط فوق (استعداد وقوع فروچاله‌ها) به‌صورت دسته‌ای از اعداد مثبت و منفی در آمده است. اعداد مثبت بیانگر وجود شرایط لازم برای توسعه‌ی کارست و اعداد منفی و متمایل به صفر، بیانگر نبودن شرایط مناسب برای توسعه‌ی کارست است. در جاهایی که به‌طور هم‌زمان تعدادی از متغیرها یا تمام آنها شرایط لازم را نداشته باشند، نتایج منفی و متمایل به صفر هستند. بنابراین چنانچه شیب زیاد، فاصله از گسل زیاد، ارتفاع کم و سنگ‌شناسی نامناسب بوده، نتایجی منفی و متمایل به صفر به‌دست آمده است که به مفهوم نبود شرایط لازم برای توسعه‌ی فروچاله‌ها در آن بخش‌ها است.



شکل ۳. فرآیند انجام مدل رگرسیونی در منطقه‌ی کارستی شاهو

الف) نقشه‌ی سنگ‌شناسی؛ ب) نقشه‌ی شیب؛ ج) نقشه‌ی طبقات ارتفاعی

در منطقه‌ی شاهو دامنه‌ی نتایج عددی حاصل از تأثیر دادن ضرایب رگرسیونی، در ماتریس داده‌ها بین ۰/۲۱۰ تا ۰/۱۵۰- است که این دامنه، بر اساس موقعیت فروچاله‌ها و شناختی که از منطقه به دست آمده، به صورت کیفی در پنج کلاس از استعداد بسیار زیاد تا بسیار کم دسته‌بندی شده است و در چهارچوب جدول شماره ۱ و نقشه‌ی استعداد توسعه‌ی کارست در منطقه‌ی شاهو (شکل‌های شماره‌ی ۴ و ۵) ارائه شده است.

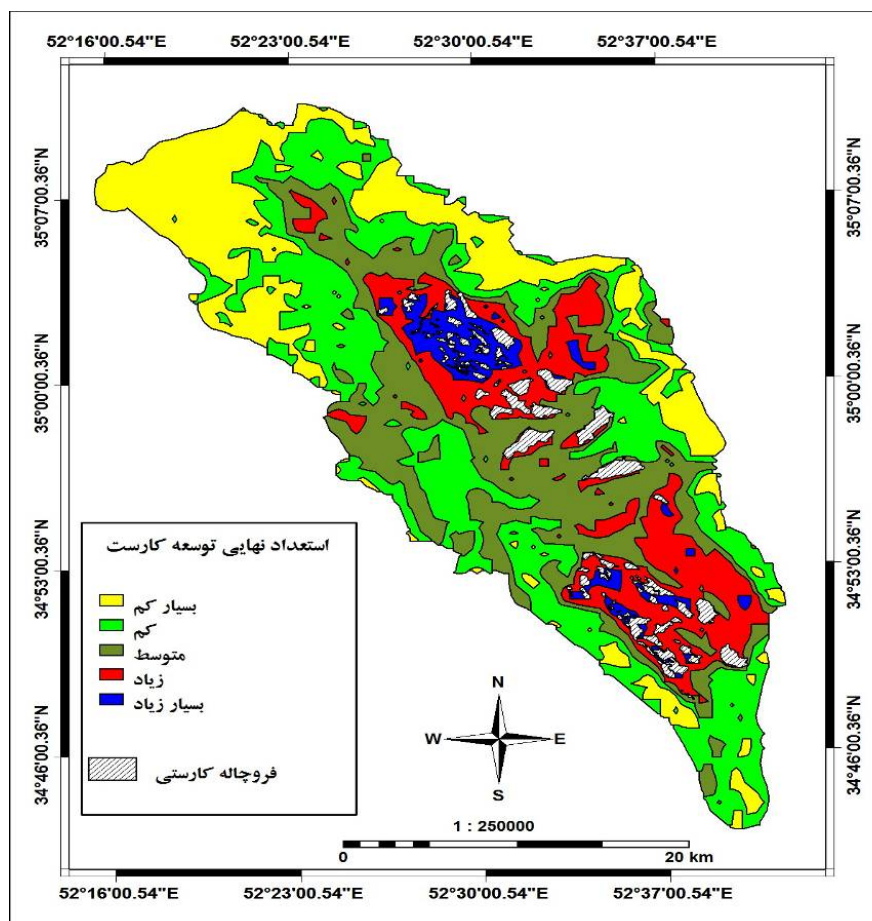


شکل ۴. نقشه‌ی استعداد اولیه توسعه‌ی کارست در منطقه‌ی شاهو

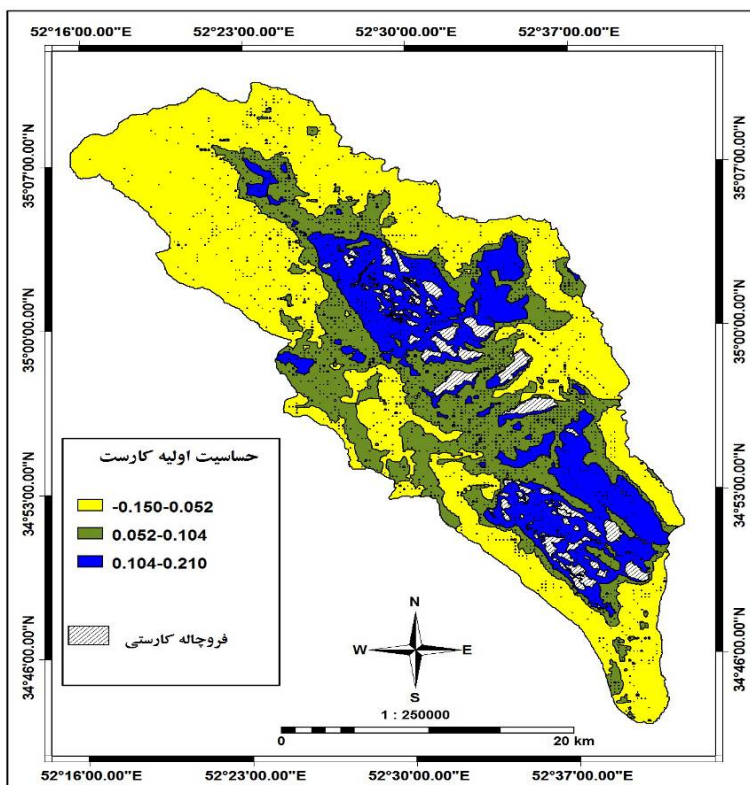
جدول ۱. داده‌های مربوط به استعداد توسعه‌ی کارست در منطقه‌ی شاهو

استعداد توسعه‌ی کارست در منطقه‌ی شاهو	
استعداد توسعه‌ی کارست	دسته‌بندی کیفی استعداد توسعه‌ی کارست
(۰/۱۵۶) - (۰/۲۱۰)	بسیار زیاد
(۰/۱۰۴) - (۰/۱۵۶)	زیاد
(۰/۰۵۲) - (۰/۱۰۴)	متوسط
(۰) - (۰/۰۵۲)	کم
(۰) - (-۰/۱۵۰)	بسیار کم

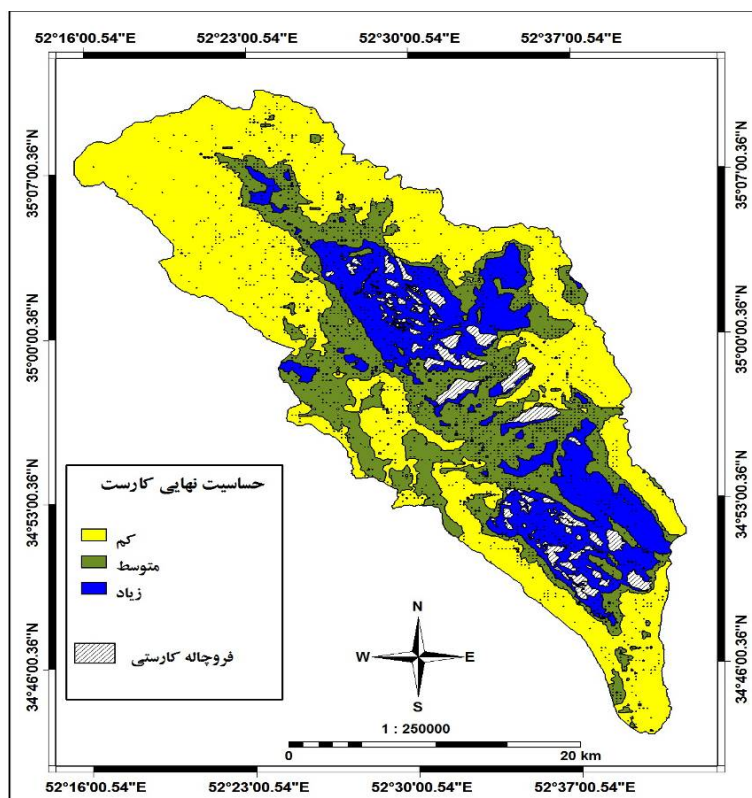
گفتنی است که پس از تهیه‌ی نقشه‌های استعداد وقوع فروچاله‌ها، برای ارزیابی نتایج به‌دست آمده، نقشه (۰) و (۱) مربوط به متغیر وابسته‌ی فروچاله‌ها، در هر دو منطقه با این نقشه‌ها هم‌پوشانی شد. بر این اساس نقشه‌ی فروچاله‌ها با بخش‌هایی که حداکثر احتمال وقوع فروچاله‌ها را نشان می‌دهند، مطابقت دارند که نشان‌دهنده‌ی کارایی این مدل است. در این بخش از بررسی با توجه به نتایج حاصل از مدل رگرسیونی اجرا شده برای منطقه‌ی کارستی شاهو و براساس نقشه‌های استعداد توسعه‌ی کارست، نقشه‌ی حساسیت کارست در سه کلاس حساسیت زیاد، متوسط و حساسیت کم ارائه شده است (شکل‌های شماره‌ی ۶ و ۷). بخش‌هایی که در کلاس حساسیت زیاد هستند با محدوده‌ی استعداد بسیار زیاد و زیاد انطباق دارد. بخش‌هایی که در کلاس حساسیت متوسط هستند با محدوده‌ی استعداد متوسط و بخش‌هایی که در کلاس حساسیت کم هستند با محدوده‌ی استعداد کم و بسیار کم تطابق دارد. این نقشه‌ها در واقع براساس نقش متغیرهای مؤثر شیب، ارتفاع و سنگ‌شناسی در منطقه‌ی شاهو بر شکل‌گیری فروچاله‌ها ترسیم شده‌اند. بنابراین، دربردارنده‌ی تمام اطلاعات مربوط به متغیرهای مؤثر و متغیر فروچاله‌ها هستند.



شکل ۵. نقشه‌ی استعداد نهایی توسعه‌ی کارست در منطقه‌ی شاهو



شکل ۶. نقشه‌ی حساسیت اولیه کارست در منطقه شاهو



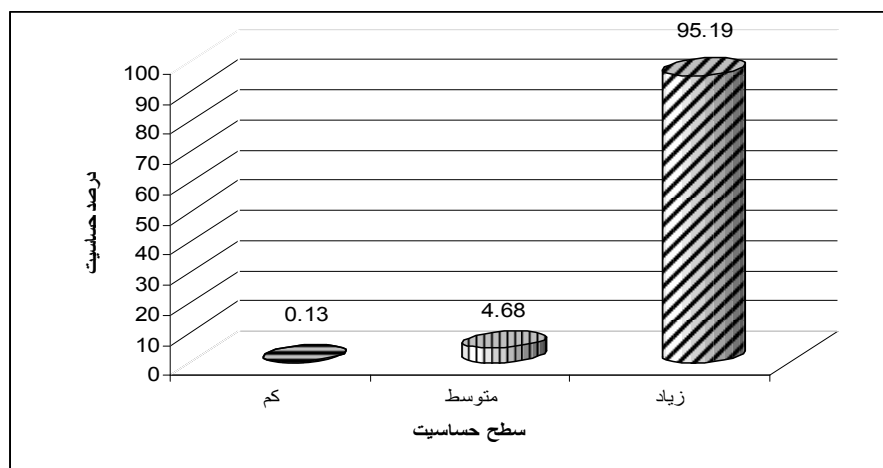
شکل ۷. نقشه‌ی حساسیت نهایی کارست در منطقه‌ی شاهو

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل رگرسیونی چند متغیره، شامل نقشه‌های پهنه‌بندی تحول کارست و حساسیت کارست با واقعیت منطقه‌ی کارستی شاهو انطباق زیادی را نشان می‌دهد که گویای کارایی بالای این مدل است. بررسی‌های میدانی و گردآوری اطلاعات مربوطه این گفته را تأیید می‌کند (جدول شماره‌ی ۲) و (شکل شماره‌ی ۸). با بررسی لندفرم‌های کارستی در منطقه‌ی شاهو از یک سو و بررسی عوامل مداخله‌گر انسانی از سوی دیگر، مشخص می‌شود که کارست‌های منطقه‌ی شاهو در معرض آسیب بالایی قرار دارند.

جدول ۲. شیوه‌ی توزیع فروچاله‌های کارستی در سطوح مختلف حساسیت کارست در منطقه‌ی شاهو

سطح حساسیت	درصد مساحت
کم	۰/۱۳
متوسط	۴/۶۸
زیاد	۹۵/۱۹



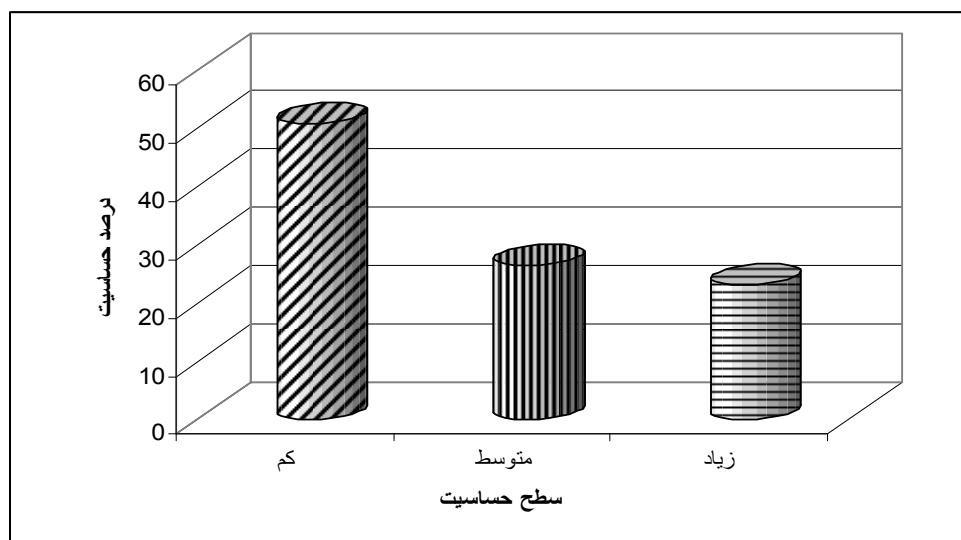
شکل ۸. نمودار توزیع فروچاله‌های کارستی در سطوح مختلف حساسیت کارست در منطقه‌ی شاهو

در منطقه‌ی کارستی شاهو، با توجه به جدول شماره‌ی ۳ و شکل شماره‌ی ۹ در حدود ۲۳ درصد از مساحت منطقه در محدوده‌ی حساسیت زیاد قرار دارد. گستردگی و تنوع لندفرم‌های کارستی در این منطقه، بسیار بالا بوده و از این رو لازم است که با توجه به ارزش‌های علمی، اقتصادی و فرهنگی آنها، تعریف مشخصی از چگونگی بهره‌برداری و حفاظت از آنها وجود داشته باشد. در این منطقه، نقشه‌ی حساسیت کارست منطقه که براساس عامل‌های ژئومورفولوژیکی تهیه شده است، می‌تواند برای تصمیم‌گیرندگان در این زمینه، بسیار راهگشا باشد.

در زمینه بهره‌برداری و حفاظت از لندفرم‌های کارستی این منطقه نیز، باید ضوابط و مقررات ویژه‌ای وجود داشته باشد که در این راستا نقشه‌ی حساسیت کارست منطقه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند. روشن است که فعالیت‌های بی‌رویه‌ی انسانی، شامل هرگونه ساخت‌وساز، احداث جاده در دل کوهستان، معدن‌کاری، چرای بی‌رویه، تولید زباله و... در محدوده‌ی حساسیت زیاد، می‌تواند تأثیر بسیار مخربی بر سیستم کارست منطقه داشته باشد. با توجه به اینکه محل تغذیه‌ی چشمه‌های کارستی در منطقه بیشتر در محدوده‌ی حساسیت زیاد واقع شده است و مهم‌ترین عامل انسانی مداخله‌کننده در این بخش‌ها، دامداران و گردشگران هستند، لازم است برای پیشگیری از تخریب و آلودگی آب‌های زیرزمینی، از سوی ارگان‌ها و سازمان‌های مربوطه دستور کارهایی برای چگونگی بهره‌برداری در این بخش‌ها ارائه شود.

جدول ۳. روش توزیع سطوح مختلف حساسیت کارست بر اساس درصد مساحت در منطقه‌ی شاهو

سطح حساسیت	تعداد پیکسل	درصد مساحت	مساحت (مترمربع)
کم	۱۶۰۷۱۲	۵۰/۶۵	۴۰۱۷۸۰۰۰۰
متوسط	۸۳۵۷۰	۲۶/۳۴	۲۰۸۹۲۵۰۰۰
زیاد	۷۳۰۰۸	۲۳/۰۱	۱۸۲۵۲۰۰۰۰



شکل ۹. نمودار توزیع سطوح مختلف حساسیت به کارست بر اساس درصد مساحت در منطقه‌ی شاهو

منابع

- Afrasiabian A., ۱۹۹۸, **Importance of Studies and Researches on Karst Water Resources of Iran**, Proceeding ۲nd International Symposium on Karst Water Resources, Iran, Tehran-Kermanshah, PP. ۱۲۶- ۱۳۷.
- COST Action ۶۲۰, ۲۰۰۴, **Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers**, Final Report (COST Action ۶۲۰), Report EUR ۲۰۹۱۲, Directorate-General Science, Research and Development, European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Ford, D.C., Williams, P.W., ۲۰۰۷, **Karst Hydrology and Geomorphology**, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- Geological Survey of Iran, **Kamyaran and Tizh Tizh ۱:۱۰۰۰۰۰ Geology Maps**.
- Gholami, V., Azodi, M. and Taghvaye Salimi, E., ۲۰۰۸, **Modeling of Karst and Alluvial Springs Discharge in the Central Alborz Highlands and on the Caspian Southern Coasts**, Caspian Journal of Environmental Sciences, Vol. ۶, No. ۱, PP. ۴۱- ۴۵.
- Goldschieder, N., ۲۰۰۵, **Karst Groundwater Vulnerability Mapping: Application of a New Method in the Swabian Alb**, Germany, Hydrogeology Journal, Vol. ۱۳, No. ۴, PP. ۵۵۵-۵۶۴,
- Hyland, E.S, Kennedy, M.L., Younos, T. and Parson, S., ۲۰۰۶, **Analyses of Sinkholes Susceptibility and Karst Distribution in the Northern Shenandoah Valley, Virginia: Implications for Low Impact Development (LID) Site Suitability Models**, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia.
- Iranian Armed Forces Geographical Organization, ۲۰۰۸, **IRS Panchromatic Satellite Imagery**.
- Iranian Armed Forces Geographical Organization, **Kamyaran, Gazerkhani, Pave and Bisaran ۱:۵۰۰۰۰ Topographical Maps**.
- Kinnear R. P., Gary D. C., ۲۰۰۰, **SPSS for Windows Made Simple: Release ۱۰**, Translated by Akbar Fotohi Ardakani, , Shaygan Publication, Tehran.
- Lamelas, M. T., Marinoni, O, Hoppe, A., Riva, J., ۲۰۰۸, **Doline Probability Map Using Logistic Regression and GIS Technology in the Central Ebro Basin (Spain)**, Environmental Geology, Vol. ۵۴, No ۵, PP. ۹۶۳-۹۷۷
- Leyland, R.C., Witthüser, K.T., Van Rooy, J.L., ۲۰۰۸, **Vulnerability Mapping in Karst Terrains, Exemplified in the Wider Cradle of Humankind World Heritage Site**, Report to the Water Research Commission, Department of Geology, University of Pretoria, Pretoria.
- Maleki, A., Shohani, D., ۲۰۰۷, **Zoning and Karst Evolution of Kermanshah Province Using GIS**, Edited by: Taheri K., Proceedings of the Conference on Water Resources of

Kermanshah Region, Kermanshah, Iran.

Milanović, T.P., ۱۹۸۱, **Karst Hydrology**, Translated by Aghasi, A.V. and Afrasiabian, A., Vol. ۱, Karst Research Center, Tehran, Iran.

Plan, L., Decker, K., Faber, R., ۲۰۰۳, **Attributed Sinks: A GIS-tool Quantifying Morphological Vulnerability Parameters in Karstic Catchment Areas**, Geophysical Research Abstracts, Vol. ۵, PP. ۱-۳۰.

Ravbar, N. and Goldsieder N., ۲۰۰۹, **Comparative Application of Four Methods of Groundwater Vulnerability Mapping in a Slovene Karst Catchment**, Hydrogeology Journal, Vol. ۱۷, No. ۳, PP. ۷۲۵-۷۳۳.