ارزیابی کارایی و آنالیز حساسیت روش COP مبتنی بر تکنیک RS و GIS در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دشت الشتر لرستان

حسین یوسفی[1*]، علی حقی‌زاده[2]، یزدان یاراحمدی[1] و پروین نورمحمدی[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۲۳)

چکیده

آلودگی آبخوان‌های کشور یکی از چالش‌های اصلی سازمان‌ها و ادارات دولتی درگیر در امور تولید و توزیع آب در بین شهروندان است. به‌منظور شناخت پتانسیل آلودگی آبخوان، ابتدا باید قابلیت آسیب‌پذیری آن در نواحی مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد و نواحی مستعد آلودگی شناسایی شوند. آبخوان‌های کربناته به‌واسطه حفره‌های بلعنده و تغذیه نقطه‌ای نسبت به آلودگی آسیب‌پذیرترند. آبخوان‌های کارستی (کربناته) یا آبخوان‌هایی که بخشی از آنها کارستی است، در مناطق غربی ایران با توجه به شرایط طبیعی منطقه و فعالیت‌های انسانی مستعد این آلودگی هستند. هدف از این پژوهش تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دشت الشتر با کاربرد روش COP است. این مدل با استفاده از سه پارامتر لایه پوشاننده (O)، غلظت جریان (C) و رژیم بارش (P) به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در برابر آلودگی در محیط نرم‌افزار GIS می‌پردازد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت مشخص شد که در این روش فاکتور P با توجه به بارش مناسب منطقه بیشترین تأثیر را در تعیین آسیب‌پذیری منطقه دارد و فاکتور C کمترین تأثیر را در آسیب‌پذیری منطقه با توجه به وسعت کم پهنه کارست تکامل‌یافته و وسعت زیاد منطقه غیر کارستی دارا است. برای صحت‌سنجی نتایج از داده‌های هدایت الکتریکی در برابر دبی چند چاه در منطقه با آسیب‌پذیری زیاد و متوسط و مقایسه آنها با هم استفاده شد. نتایج به‌دست آمده بیانگر این است که قسمت غالب دشت با مساحت ۸۷/۷ کیلومترمربع ازنظر آسیب‌پذیری در طبقه متوسط قرار دارد و سایر طبقات به‌ترتیب شامل کم با مساحت ۶۹/۱۸ کیلومترمربع، زیاد با مساحت ۰/۶۵ کیلومترمربع در قسمتی از شمال شرقی دشت و خیلی کم با مساحت ۰/۶ کیلومترمربع است.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، روش COP، GIS، آبخوان کارستی دشت الشتر

۱. گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران
۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Hosseinyousefi@ut.ac.ir

مقدمه

امکان نفوذ و انتشار آلاینده‌ها به درون سیستم آب زیرزمینی را آسیب‌پذیری می‌نامند. آسیب‌پذیری به‌عنوان یک استعداد ذاتی سیستم آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود که وابسته به‌میزان حساسیت این سیستم به تأثیرات انسانی و یا طبیعی است. وربا وهمکاران (۱۹) بیان کردند یکی از روش‌هایی که کمک مؤثری به مدیریت آب‌های زیرزمینی می‌کند، تهیه نقشه‌هایی است که در آنها مناطق آسیب‌پذیر یا حساس نسبت به آلودگی مشخص است، بدین ترتیب می‌توان مناطق مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد و معیاری واحد جهت ارزیابی در اختیار داشت.

ناصری و همکاران (۱۵) بیان کردند سفره‌های آب کارست نسبت به آلودگی حساسیت زیادی دارند، زیرا زمان جابه‌جایی سریع و ظرفیت ذخیره‌سازی در سیستم مجرایی کم است، در نتیجه دخالت فرایندهای طبیعی مانند جذب و تخریب و فیلتراسیون تأثیر کمتری دارند. مودارا وهمکاران (۱۴) نشان دادند تحقیقات جغرافیایی در آلودگی آب‌های زیرزمینی بر دو موضوع فاصله آلودگی و منابع آلاینده توجه دارد. بر همین اساس کمیسیون اروپا، رویکرد COST ۶۲۰ را به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری و تهیه نقشه خطر منابع آب کارست ارائه کرده است. روش COP توسط COST ۶۲۰ توسعه داده شد و در دو آبخوان کارستی در جنوب اسپانیا با ویژگی‌های مختلف آب‌وهوایی و هیدرولوژیکی آزمایش و توسعه داده شد. در مدل COP از سه عامل به‌منظور تعیین میزان آسیب‌پذیری استفاده می‌شود که شامل (C) غلظت جریان، (O) لایه پوشاننده و بارش(P) است. تهیه نقشه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی یک رویکرد علمی برای حفظ منابع آب زیرزمینی است که برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ مطرح شد، نتایج آدامز وهمکاران (۵) نشان داد این رویکرد به‌طور قابل‌توجهی در طول دهه گذشته به‌علت پیشرفت در مدل هیدرولوژیکی و GIS مورد توجه قرارگرفته است ، سیف وهمکاران (۳) به‌منظور ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گلین کرمانشاه از مدل COP استفاده کردند. باقرزاده و همکاران (۲)، به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان شیمبا به روش COP با استفاده از GIS و سنجش از دور پرداختند. اسدی و همکاران (۱)، با به‌کارگیری دو روش COP و Paprika نقشه آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان بقیع خراسان رضوی را تهیه کردند. دومار (۹) نقشه آسیب‌پذیری را با روش‌های COP و EPIK به‌دست آوردند، همچنین روش COP توسط دیمیتریو و همکاران (۸) در یونان، لی‌لند (۱۳) در آفریقای جنوبی، پلن وهمکاران (۱۶) در استرالیا، دیوسی (۱۰) در ایتالیا، روبر (۱۷) در اسلونی به‌کار گرفته شده است. هدف از این پژوهش، به‌کارگیری مدل COP با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان یک روش مؤثر در تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دشت الشتر است.

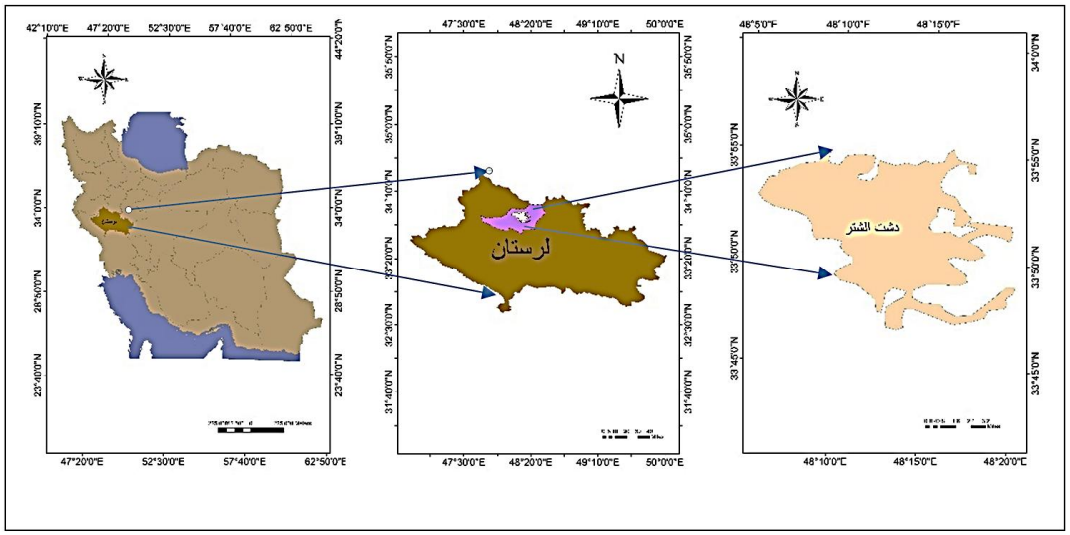
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی الشتر یکی از محدوده‌های شمالی استان لرستان است که از اقلیم نسبتاً سرد و بارش مناسبی برخوردار است. این محدوده به‌لحاظ وجود ارتفاعات آهکی، بارش برف و باران و آبرفت مناسب دارای منابع آب زیرزمینی قابل توجه، چشمه‌ها و رودخانه‌های دائمی است که از سرشاخه‌های رودخانه کرخه محسوب می‌شوند. موقعیت جغرافیایی آن بین ۳۳ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۳۴ درجه و صفر دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه طول جغرافیایی شرقی است. با توجه به آمار ایستگاه‌های بارندگی منطقه و اطراف و رابطه ارتفاع- بارندگی و خطوط هم‌باران منطقه، مقدار متوسط بارش در ارتفاعات و دشت الشتر به‌ترتیب ۶۴۵/۷ و ۵۱۵/۷ میلی‌متر است (۳). در شکل (۱) نیز می‌توان موقعیت دشت الشتر را در شهرستان، استان و ایران مشاهده کرد.

ویژگی‌های ژئومورفولوژی محدوده مطالعاتی الشتر

محدوده مطالعاتی الشتر به فرم یک گرابن است که با ارتفاعات نسبتاً بلند گرین، ورخاش، مهاب، سرخه، داریکنان و نشاته

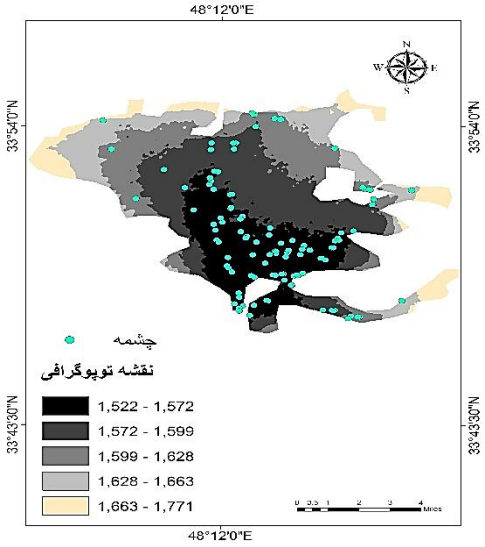


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

احاطه شده است. تشکیلات زمین‌شناسی این منطقه متعلق به دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک است. سنگ‌های آهکی ژوراسیک-کرتاسه بخش عمده منطقه را پوشانده است و به‌عنوان مهم‌ترین واحدهای تغذیه شونده (منابع آب کارستیک) محسوب می‌شوند. با توجه به اینکه کوه‌های منطقه عمدتاً از سنگ‌های رسوبی و بیشتر از نوع آهکی هستند، اشکال خاص نواحی کارستیک را می توان به وفور در حوضه مشاهده کرد. وجود بریدگی ناشی از عمل تخریب شبکه آب‌های جاری در یال‌ها که شباهت بسیار همسانی با دره‌های عرضی دارند و وجود لاپیه حک شده بر سنگ‌های آهکی، چاه‌های انحلالی، تنگ و شکاف انحلالی و دیگر اشکال مرفولوژیک کارستی، همگی نشان‌دهنده این اشکال در سطح منطقه هستند. با بررسی‌های به‌عمل آمده در سازندهای سخت منطقه به‌خصوص سازندهای کربناته، علاوه‌بر ترکیب شیمیایی، جنس، تراکم، لایه‌بندی، شرایط رسوب‌گذاری و نظایر آن از نظر تکتونیکی، عواملی مثل فعالیت‌های کوه‌زایی گسل‌ها و زلزله، بیشترین و مهم ترین نقش را درایجاد کارست و توسعه آن دارند، این عوامل باعث ایجاد شکستگی و درز و شکاف شده است که نفوذ آب‌های دارای گاز کربنیک درآنها، باعث انحلال و ایجاد حفره‌ها می‌شود که به‌تدریج گسترش یافته و در نهایت در صورت مناسب بودن شرایط، به ایجاد غارهای وسیع منتهی می‌شود. به‌طورکلی ازنظر تکامل مرفولوژیکی منطقه نسبتاً جوان است و رشته کوه‌های بلند اکثراً از طبقات آهکی کرتاسه تشکیل شده است. در محدوده مورد مطالعه، به علت قرارگیری در ناحیه رورانده زاگرس، تحمل فشارهای تکتونیکی و گسل‌های زیاد کاملاً خرد شده هستند و از طرفی دیگر به‌دلیل عملکرد فرایندهای کارست‌زائی از نفوذپذیری بسیار خوبی برخوردار هستند و در نتیجه آبخوان کارستی بسیار مطلوبی را خصوصاً در واحد نابرجای شرق، جنوب شرق و شمال محدوده ایجاد کرده است. وجود سرآب‌ها در سرچشمه رودخانه کهمان (آب الشتر) و دیگر چشمه‌های کارستی منطقه نظیر سرآب چنار، سرآب زز، سرآب هنام، سرآب کهمان و غیره، خود دلیل کارستی بودن طبقات آهکی منطقه است (۴). در شکل (۲) پراکندگی چشمه های دشت در نقشه توپوگرافی نشان داده شده است.

روش COP

درروش COP آسیب‌پذیری به‌عنوان برایندی از سه عامل O،C و P مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عامل (O) بررسی حفاظت از مناطق غیر اشباع آبخوان در برابر رخداد یک عامل آلاینده است



شکل ۲. موقعیت چشمه‌های دشت الشتر در طبقات ارتفاعی

و عوامل P و C برای تصحیح درجه حفاظت (عامل O) استفاده می‌شوند (۶). در این روش (O) لایه پوشاننده، (C) غلظت جریان و (P) رژیم بارش است. عامل O شرح حفاظت آب‌های زیرزمینی توسط لایه‌های بالاتر از منطقه اشباع شده است. عامل C براساس ژئومورفولوژی کارست، پوشش گیاهی و شیب توپوگرافی محاسبه می‌شود. شکل (۳) چگونگی و محاسبه روش COP را نشان می‌دهد. عامل P شامل مقدار بارش و توزیع زمانی آن (شدت) است و قدرت آب را برای حمل‌ونقل آلاینده‌ها از سطح زمین به داخل آبخوان‌ها تعیین می‌کند. هرکدام از این عامل‌ها خود به زیرعامل‌هایی تقسیم می‌شوند که دارای چند کلاس با رتبه‌های اختصاصی هستند. هرکدام از عامل‌ها و زیرعامل‌هایشان در محیط GIS تهیه می‌شوند.

در نهایت نقشه‌های هر عامل براساس معادله (۱) همپوشانی شوند تا نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی به روش COP حاصل شود:

$$COP\ Index = C \cdot O \cdot P \qquad [۱]$$

در این رابطه C: تمرکز جریان، O: لایه پوششی و P: بارش است.

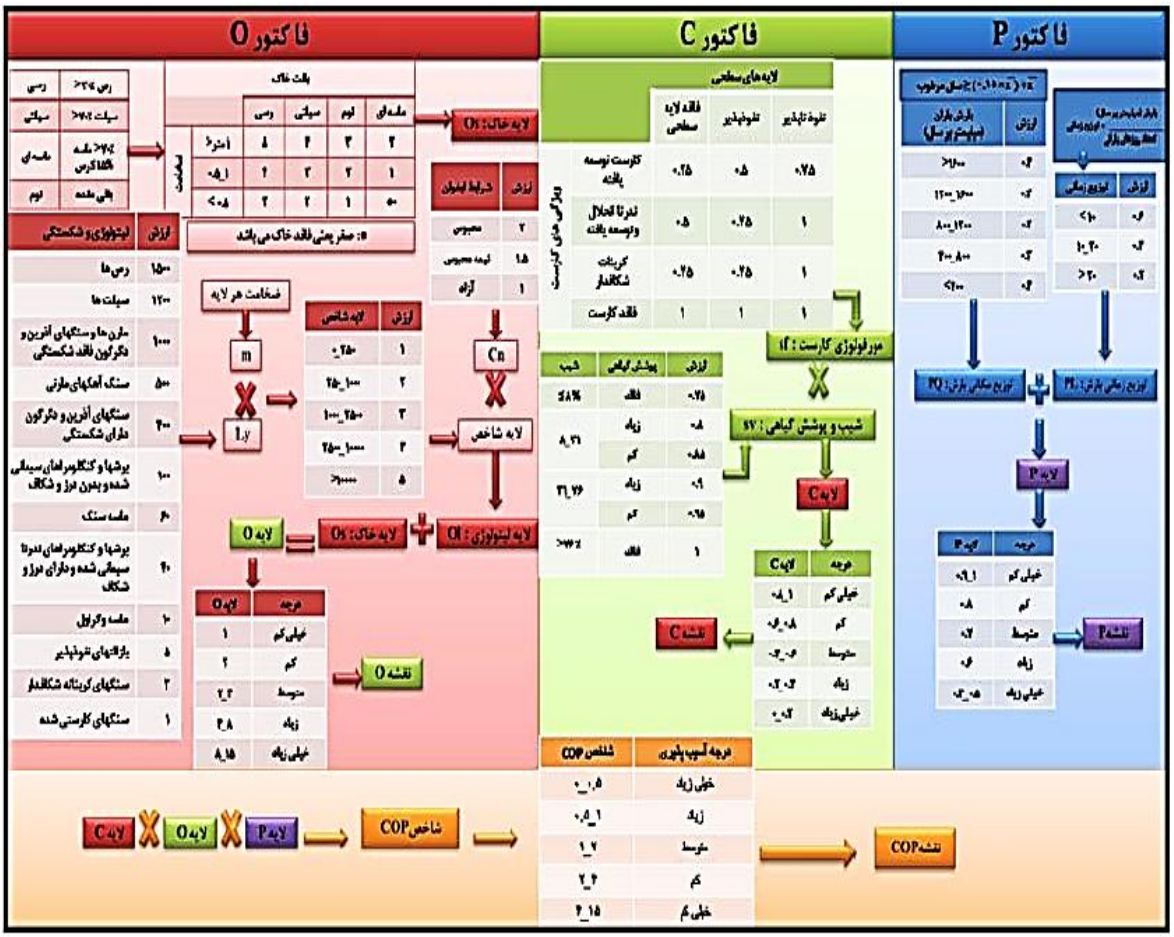
شاخص آسیب‌پذیری برای روش COP، بین صفر تا ۱۵ متغیر است و به پنج کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد (۰ – ۰/۵)، زیاد (۰/۵ – ۱)، متوسط (۱ – ۲)، کم (۲ – ۴) و خیلی کم (۴ – ۱۵) تقسیم می‌شود.

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در محیط GIS انجام شده است. در این تحقیق از منابع اطلاعاتی گوناگونی از جمله نقشه DEM منطقه به‌منظور تهیه نقشه شیب، نقشه خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، (به‌ترتیب در شکل ۴)، آمار بارندگی و همچنین آمار دبی و هدایت الکتریکی چشمه‌های دشت الشتر جهت صحت‌سنجی نقشه نهایی استفاده شد.

تهیه لایه‌های روش COP

لایه تمرکز جریان عامل (C)

عامل (C) نمایانگر مقداری از بارندگی است که در حفرات فرورونده، متمرکز شده و از ناحیه غیراشباع میانبر می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) آمده است، تمرکز جریان برای مناطق کارستی در قالب دو سناریو تعریف شده است که با توجه به خصوصیات هیدروژئومورفولوژیکی و ژئومورفولوژی و همچنین زمین‌شناسی ساختمانی منطقه ،یکی یا هر دو سناریو انتخاب و اجرا می‌شود. برای منطقه مورد مطالعه، سناریو دو جهت ارزیابی عامل (c) انتخاب شد. براساس این سناریو، نیاز به تهیه دو نقشه زیر عامل‌های عوارض سطحی (sf) و



شکل ۳. نحوه محاسبه فاکتورهای به‌کار رفته درروش COP (Vias et al., ۲۰۰۶)

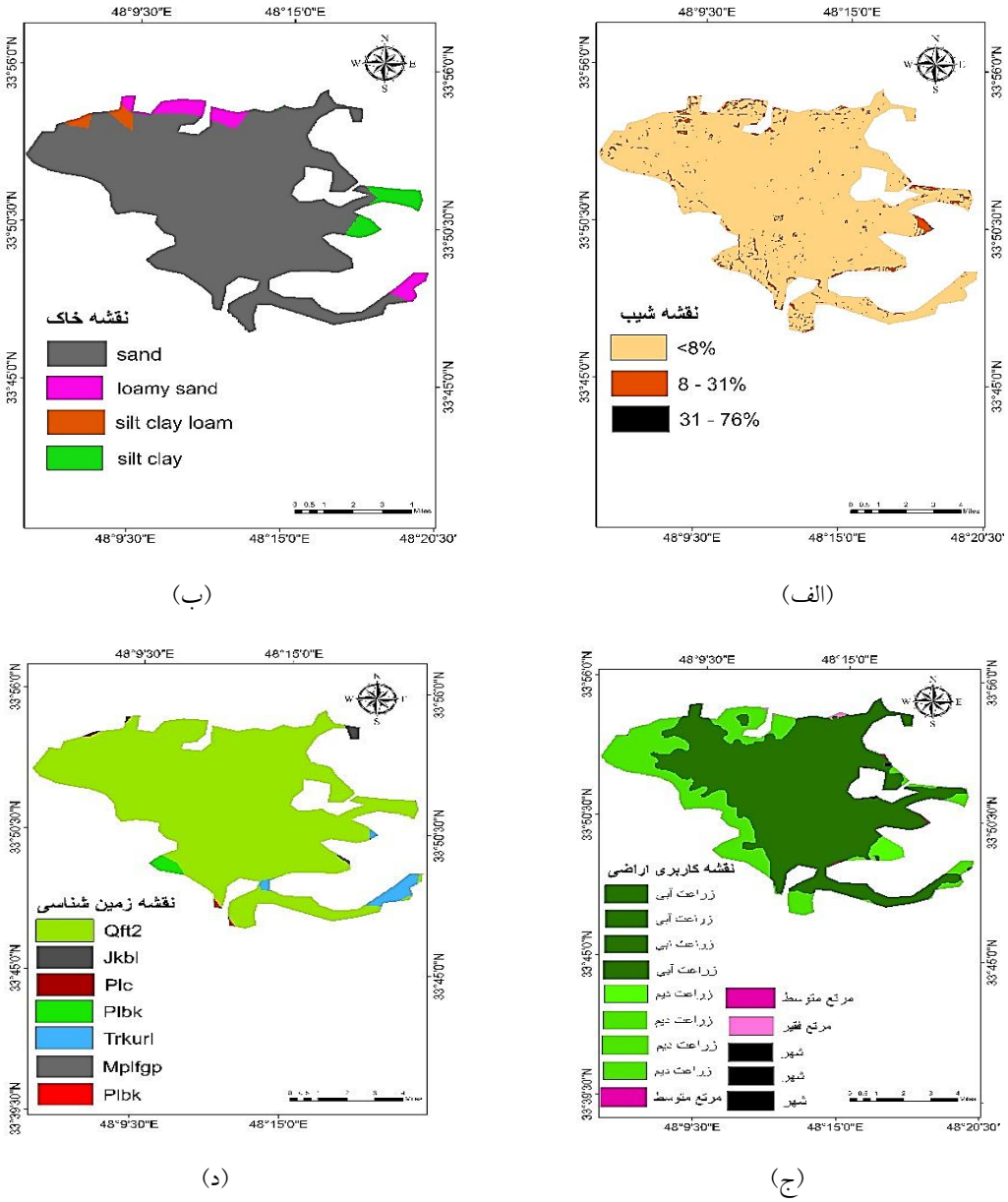
شیب - پوشش گیاهی (sv) است تا نقشه نهایی عامل C تهیه شود. عوارض سطحی (sf): پارامتر عوارض سطحی آن دسته از اشکال ژئومورفولوژیکی مختص به سنگ‌های کربناته و حضور یا فقدان هرگونه لایه پوشاننده‌ای (نفوذپذیر یا نفوذناپذیر) که تعیین‌کننده اهمیت فرایندهای رواناب و یا نفوذ است را در نظر می‌گیرد.

الف- شیب - پوشش گیاهی: برای تهیه نقشه شیب - پوشش گیاهی ابتدا نقشه شیب منطقه تهیه شد. نقشه پوشش گیاهی نیز مطابق با معیارهای شکل (۳)، تهیه شد. سپس برای تهیه نقشه شیب - پوشش گیاهی، دو نقشه شیب و نقشه پوشش گیاهی باهم ترکیب و ارزش‌گذاری شدند. درنهایت نقشه‌های عوارض سطحی و شیب - پوشش گیاهی همپوشانی و کلاس‌بندی شدند و نقشه تمرکز جریان حاصل شد (شکل ۵).

با توجه به شکل (۵)، نواحی که با رنگ توسی و قرمز مشخص شده‌اند، نشان‌دهنده تأثیر بیشتر عامل (C) هستند و به این معنی است که حفاظت آبخوان کارستی کمتر می‌شود که با توجه به نقشه زمین‌شناسی این نواحی منطبق با مناطق با سازند آهکی و کارستی است و برعکس نواحی که با رنگ زرد و آبی مشخص‌شده‌اند، نشان‌دهنده تأثیر کمتر عامل (C) هستند و در نتیجه حفاظت آبخوان کارستی بیشتر می‌شود.

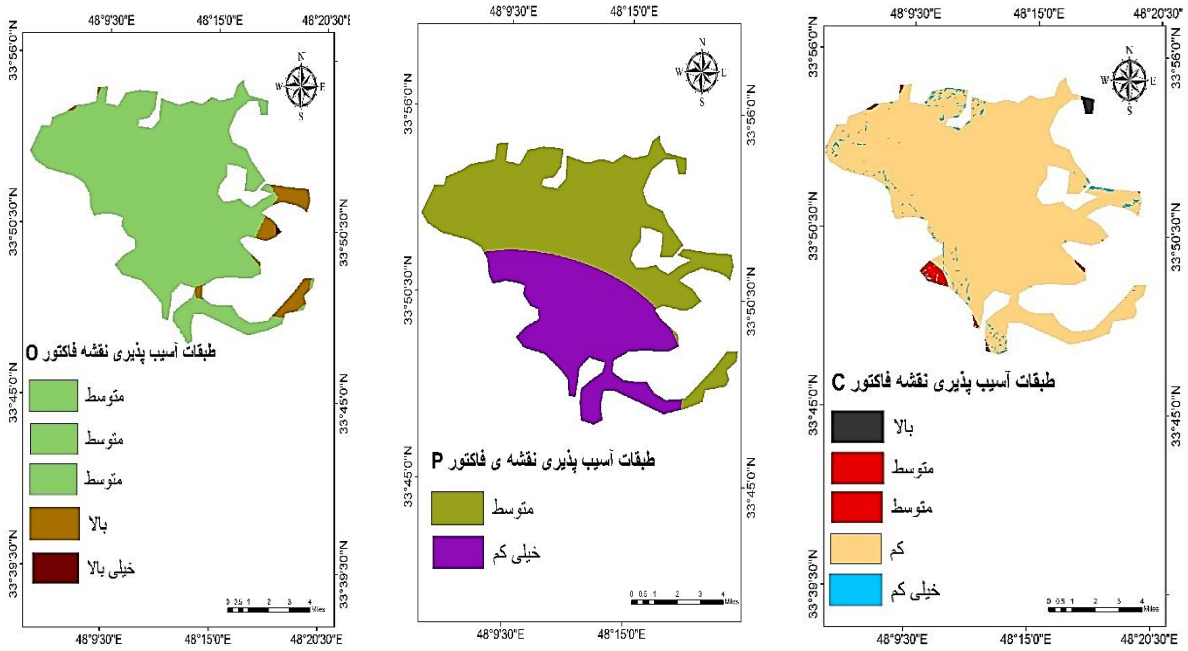
لایه‌های پوششی (عامل O)

لایه‌های پوششی حفاظت آبخوان را مدنظر قرار می‌دهد که به‌وسیله خصوصیات فیزیکی و ضخامت لایه‌های بالای منطقه غیراشباع مشخص می‌شود. در روش COP فقط دو لایه با نقش هیدروژئولوژیکی مهم به‌منظور ارزیابی عامل (O) در نظر گرفته



شکل ۴. الف) نقشه خاک، ب) نقشه شیب، ج) نقشه کاربری اراضی و د) نقشه زمین‌شناسی دشت الشتر

می‌شود که شامل خاک (OS) و لیتولوژی لایه‌های ناحیه غیراشباع (OL) است. با توجه به شکل (۳) لایه‌های مورد نظر تهیه شد. همچنین رتبه پارامتر cn برای منطقه مورد مطالعه با توجه به آزاد بودن آبخوان آن برابر با یک است. طبق شکل (۳)، لایه os با توجه به نقشه خاک و لایه ol با توجه به سازندهای زمین‌شناسی منطقه و با در نظر گرفتن نوع آبخوان منطقه که آزاد است، وزن‌دهی و تهیه شدند. از ترکیب این دو لایه، پارامتر (O) تهیه شد. روش کلی تعیین لایه‌های هر پارامتر و وزن‌های اختصاصی در شکل (۳) بیان شده است. توضیح و تهیه جدول برای تهیه هر لایه و پارامتر سبب طولانی شدن مقاله می‌شود. درنهایت نقشه‌های خاک و لیتولوژی همپوشانی و کلاس‌بندی شدند و نقشه لایه‌های پوششی حاصل شد (شکل ۵). همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، قسمت‌های با رنگ قهوه‌ای روشن و تیره حافظت زیادی در برابر آسیب‌پذیری آبخوان ایجاد می‌کند.



شکل ۵. الف)نقشه تمرکز جریان (عامل C)، ب) نقشه لایه بارش (عامل P) و ج) نقشه آسیب‌پذیری نقشه فاکتور(O)

لایه بارش (P)

بر طبق نظر دیلی و همکاران (۷) عامل P، شامل مقدار بارش و عامل‌هایی که نرخ نفوذ را افزایش می‌دهند مانند تناوب، توزیع زمانی، مدت و شدت بارش‌های سیل‌آسا است. این عامل‌ها به تعیین توانایی بارش برای حمل آلاینده‌ها از سطح به آب زیرزمینی کمک می‌کنند. عامل P به‌وسیله دو زیر عامل مقدار بارش (PQ) و توزیع زمانی بارش (PI) ارزیابی می‌شود.

مقدار بارش: بدین منظور اقدام به تهیه نقشه سطوح هم‌بارش جهت محاسبه مقدار بارش منطقه مورد مطالعه شد. به این صورت که میانگین بارش سالانه برای سال‌های ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۳-۱۳۹۲ محاسبه و به روش IDW، نقشه هم‌بارش تهیه و سپس طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری شد و نقشه PQ تهیه شد. مقدار بارش برای منطقه مورد مطالعه در رده ۸۰۰ – ۴۰۰ میلی‌متر بر سال قرار دارد که دارای ارزش ۰/۳ است.

توزیع زمانی بارش: عامل PI، توزیع زمانی بارش را در یک دوره زمانی معین در نظر می‌گیرد و از این‌رو نمایانگر شدت بارش است. به‌منظور تهیه نقشه توزیع زمانی بارش، توزیع زمانی بارش، برای هر ایستگاه باران‌سنجی براساس معادله (۲) محاسبه شد و بعد از تهیه بانک اطلاعاتی در محیط اکسل، به فرمت قابل‌قبول در محیط GIS تبدیل شد و سپس با درون‌یابی و طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری، نقشه توزیع زمانی بارش تهیه شد. توزیع زمانی بارش برای کل منطقه مورد مطالعه در رده کمتر از ۱۰ و ۲۰ – ۱۰ میلی‌متر بر روز (که به‌ترتیب دارای ارزش ۰/۶ و ۰/۴) قرار می‌گیرد.

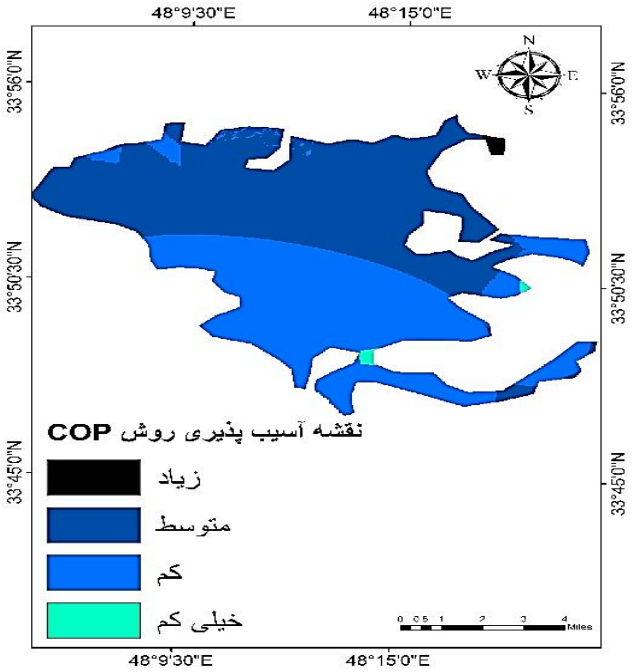
$$PI = \frac{P}{N^{\circ}} \qquad [۲]$$

در این رابطه P: میانگین بارش سالانه (میلی‌متر بر سال) و N: تعداد روزهای بارانی است. در نهایت نقشه‌های مقدار بارش و توزیع زمانی بارش هم‌پوشانی شدند و نقشه بارش حاصل شد (شکل ۵).

نتایج و بحث

نقشه آسیب‌پذیری COP دشت الشتر

جهت محاسبه اندیس نهایی COP از معادله (۱) استفاده شد که این اندیس برای منطقه بین ۰/۷ تا ۵ است و به چهار کلاس آسیب‌پذیری زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم می‌شود.



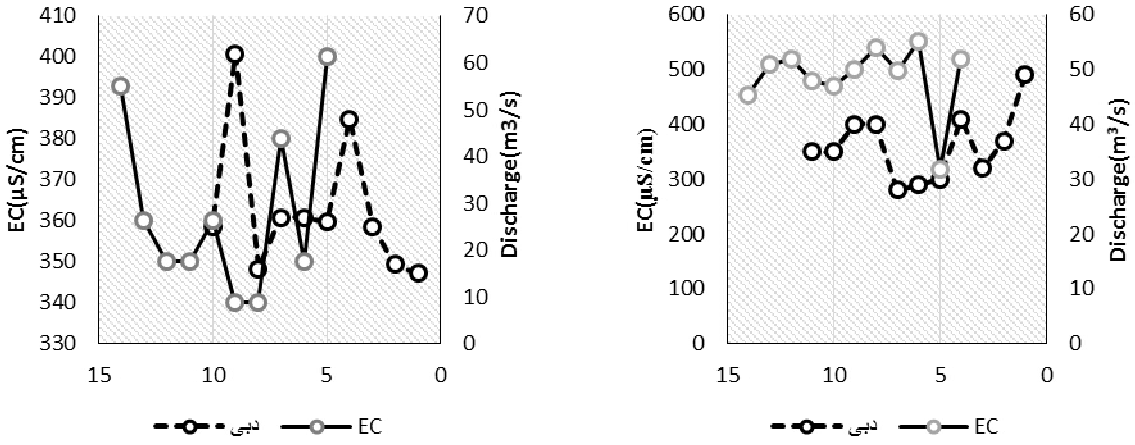
شکل ۶. نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دشت الشتر به روش COP

شکل (۶) نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه بـه روش COP را نشان می‌دهد.

برای صحت‌سنجی نتـایج روش COP از داده‌هـای هـدایت الکتریکی در برابر دبی، چشمه‌های سیاهپوش و چشمه برقـی در سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۰ استفاده شد، روش غالب صحت‌سنجی در مقـالاتی کـه در ایـن حیطـه کـار کـرده‌انـد، ایـن روش صحت‌سنجی است. از آنجایی‌که هدایت الکتریکی در هـر سـال یک یا دو بار اندازه‌گیری و ثبت شده بـود، در مقابـل EC ثبـت شده در هر ماه از هر سالی دبی ثبت شده در همان زمـان را نیـز از داده‌ها استخراج کـرده و مـورد مقایسـه قـرار دادیـم. چشـمه چشمه‌برقی در محدوده‌ای از آبخوان دشت الشتر قـرار دارد کـه طبق نتایج دارای آسیب‌پذیری متوسط است و چشمه سیاهپوش در منطقه با آلودگی خیلی کم قرار دارد. همان‌طورکـه در شـکل (۶) مشاهده می‌شود، افزایش دبـی در چشـمه چشـمه‌برقـی بـا کـاهش EC همـراه اسـت کـه ایـن نشـان‌دهنـده پاسـخ سـریع هیدرودینامیکی چشمه مذکور به تغذیه است، زیرا اخـتلاط آب سطحی با آب زیرزمینی، در فاصله زمانی کوتاه، باعث مـی‌شـود میزان هـدایت الکتریکـی آب زیرزمینـی کـاهش یابـد. خمینـز و همکاران (۱۱) بیان کردند که زمان عبور آب از سطح به زیرزمین در آبخوان‌های کارستی، در نتیجه توسعه زهکشی کارستی کوتاه می‌شود، بنابراین حوضه آبریز چشمه چشمه‌برقی دارای زهکشی توسعه یافته است و درنتیجه آلودگی‌ها بدون فرایند رقیق‌سـازی طبیعی وارد آبخوان می‌شـوند و درنتیجـه احتمـال آلـوده شـدن حوضه آبریز این چشمه زیاد اسـت، امـا تغییـرات دبـی در برابـر هدایت الکتریکی در چشمه سیاهپوش به‌صورت تدریجی است و هیچ افت‌وخیز خاصـی نـدارد (شـکل ۷). در نتیجـه، روشـن می‌شود که حوضه آبریز این چشـمه از زهکشـی توسـعه‌یافتـه‌ای برخوردار نیست، بنابراین موارد بالا نتایج حاصله را تائید می‌کند. تعیین توسعه کارست زیرسطحی پیچیده است و تنهـا بـا میـزان آبدهی چشمه که ممکن است برگرفته از عوامل مختلفی باشـد، قابل تعیین نیست.

نتایج آنالیز حساسیت (به روش حذف نقشه)

تحلیل حساسیت حذف نقشه، حساسیت نقشه آسـیب‌پـذیری را با حذف یـک یـا تعـداد بیشـتری از نقشـه‌هـا نشـان مـی‌دهـد. حساسیت حذف نقشه با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شـود.



(ب) (الف)

شکل ۷. به‌ترتیب نمودار هدایت الکتریکی در برابر دبی چشمه الف) چشمه برقی و ب) سیاهپوش

جدول ۱. نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف تک‌نقشه در دشت الشتر

پارامتر حذف شده	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف معیار
C	۳۹۷/۶	۹۷۰	۳۷۰	۷۰/۷۷
O	۷۵۵۱/۴	۸۵۹۰	۳۸۲۰	۳۳۹/۰۴
P	۷۷۹۴/۶	۹۱۵۰	۴۰۵۰	۳۳۹/۵۰

$$S = \frac{\frac{D}{N} - \frac{D'}{n}}{D} \qquad [۳]$$

در این رابطه، S میزان حساسیت را نشان می‌دهد، D و D' به‌ترتیب شاخص‌های آسیب‌پذیری بدون حذف نقشه یا با حذف نقشه هستند. N و n تعداد لایه‌های مورد استفاده در محاسبه D و D' هستند. با حذف تک‌تک پارامترهای مدل، میزان حساسیت نقشه نسبت به هر پارامتر به‌دست آمد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که درروش COP، بیشترین تغییر در شاخص آسیب‌پذیری با حذف فاکتور P (عامل بارش)، با میانگین تغییرات ۷۷۹۴/۶ اتفاق می‌افتد و فاکتور C کمترین تأثیر را در شاخص آسیب‌پذیری منطقه با توجه به وسعت کم پهنه کارست تکامل یافته و وسعت زیاد منطقه غیر کارستی دارا است. نتایج آماری، حساسیت حذف نقشه در جدول (۱) نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

روش COP از جدیدترین روش‌هایی است که جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با هر سیستم جریان، ابداع شده است. تلفیق این روش با فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی باعث شده است تا با صرف وقت و هزینه کمتر به نتایج مطلوبی دست بیابیم. به‌منظور ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت الشتر از مدل COP متشکل از سه پارامتر C، O، P استفاده شد. بعد از امتیازدهی به عوامل سه‌گانه، با استفاده از تابع Raster Calculate، این لایه‌ها در یکدیگر ضرب شده و میزان شاخص COP بین ۰/۷ تا ۵ محاسبه و آسیب‌پذیری به چهار طبقه زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد، که طبقات از نظر مساحت به‌ترتیب شامل: متوسط با مساحت ۸۷/۷ کیلومترمربع، کم با مساحت ۶۹/۱۸ کیلومترمربع، زیاد با مساحت ۰/۶۵ کیلومترمربع و خیلی‌کم با مساحت ۰/۶ کیلومترمربع است. بیشترین پهنه

مربوط به طبقه متوسط و سپس کم است که طبق نقشه زمین‌شناسی منطبق با سازند آبرفتی (Qft2) هستند و طبقه زیاد که مساحت کمی در قسمت شمال شرقی دشت را به خود اختصاص داده است منطبق بر سازند آهکی ژوراسیک – کرتاسه که یک منبع کارستی است، است. بررسی نقشه آسیب‌پذیری به‌دست آمده نشان می‌دهد که عامل (C) به‌علت وسعت کم پهنه کارست تکامل یافته، وسعت زیاد مناطق غیر کارست، نقش اصلی را در کم بودن میزان آسیب‌پذیری منطقه دارا است. فاکتور (P) بیشترین نقش را در میزان آسیب‌پذیری داراست که در مناطق با پهنه کم کارست تکامل‌یافته این امر طبیعی به‌نظر می‌رسد. نقشه عامل (O) حاکی از آسیب‌پذیری متوسط، زیاد تا خیلی زیاد منطقه است که نشان‌دهنده گسترش سازندهای نفوذپذیر آهکی، ماسه‌ای - گراولی در منطقه است. در این راستا اقدامات مدیریتی نظیر تعیین حریم نواحی کارستی تکامل‌یافته دارای سیستم زهکشی برای جلوگیری از ورود عوامل آلاینده و همچنین ایجاد سازه‌های تغذیه مصنوعی با آب باران، در نواحی مذکور پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. اسدی، م. ن. بقایی‌نژاد، ش. غلامپور و ع. بهشتی قله زو. ۱۳۹۴. تهیه نقشه آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان بقیع خراسان رضوی به دو روش cop و Paprika با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS، *مجله مهندسی منابع آب* ۸(۲۵): ۳۰-۲۳.

۲. باقرزاده، س.، ن. کلانتری، م. مرادزاده، م. رحیمی، م. فاضلی و م. کشاورزی. ۱۳۸۹. جدیدترین روش پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با استفاده ازتکنیک های GIS و سنجش‌ازدور: روش COP (مطالعه موردی آبخوان کارستی شیمبا)، همایش ملی ژئوماتیک، تهران.

۳. سیف، ع.، م. جعفری اقدم و ع. جهانفر. ۱۳۹۳. ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی گُلین، استان کرمانشاه با استفاده از مدل COP، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی* ۳(۳): ۷۹-۶۵.

۴. شرکت سهامی آب منطقه‌ای لرستان. ۱۳۹۱، گزارش توجیهی تخصیص منابع آب محدوده مطالعاتی الشتر. لرستان.

5. Adams, B. and S. S. D. Foster. 1992. Land-surface zoning for groundwater protection. Journal of the Institution of *Water and Environmental Management* 6: 312–3.
6. Andreo, B., N. Goldscheider, I. Vadillo, J. Mar Vias, C. Neukum, M. Sinreich, P. Jime´nez, J. Brechenmacher, F. Carrasco, H. Hotzl, M. JesuPerles and F. Zwahlen. 2006. Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in theSierra de Lı´bar (Southern Spain), *Science of the Total Environment* 357: 54– 73.
7. Daly, D., A. Dassargues, D. Drew, S. Dunne, N. Goldscheider, S. Neale, C. Popescu and F. Zwhalen. 2002. Main concepts of the " European Approach" for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10(2): 340–345
8. Dimitriou, E., I. Karaouzas, K. Sarantakos, I. Zacharias, K. Bogdanos and A. Diapoulis. 2008. Groundwater risk assessment at a heavily industrialised catchment and the impacts on a peri- urban wetland, *Journal of Environmental Management* 88(3): 526-538.
9. Doummar, J., A. Margane, T. Geyer and M. Sauter. 2012. Vulnerability Mapping Using the COP and EPIK Methods, Republic of Lebanon Council for Development and Reconstruction CDR Beirut, FEDERAL Republic of Germany Federal Institute for Geosciences and Natural Resources BGR Hannover.
10. Ducci, D. 2007. Intrinsic vulnerability of the Alburni karst system (southern Italy). *Geological Society of London* 279(1): 137-151.
11. Jim´enez, P., B. Andreo and F. Carrasco. 2004. An´alisis de la descarga del sector nororiental de la Unidad Hidrogeol´ogica de L´ıbar (Provincias de M´alaga y C´adiz, Sur de Espa˜na) [Analysis of the discharge in the NE sector of Sierra de Libar hydrogeological unit (Provinces of Malaga and Cadiz, S Spain). *In:* Proceeding of the Portuguese-Spanish Congress on Groundwater in the South of Iberian Peninsula], Faro, Portugal. PP: 106–117.
12. Kattaa, B., W. Al-Fares and A. Al Charideh. 2010. Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method, *Journal of Environmental Management* 91: 1103–1110.
13. Leyland, R. 2008. Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the widercradle of humankind world

heritage site, MSc. Thesis. Sciencia (Environmental and Engineering Geology) in the Department of Geology, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of Pretoria, South Africa.

14. Mudarra, M. and B. Andreo. 2011. Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers, The case of Alta Cadena (Southern Spain), *Journal of Hydrology* 397: 263–280.
15. Nasseery, H. R. and F.Saremi Nej jad. 2012. Comparing vulnerability delineativ ve of aquifer using DRASTIC and fuzzy logic methods (case study: Gulgir plain of Masjed Solieman, Iran), *In:* Proceeding of the GIS Ostrava 2012 Conference. Czech Republic.
16. . Plan, L., K. Decker, R. Faber, M. Wagreich and B. Grasemann. 2009. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus, *Environmental Geology* 58(2): 285–297.
17. Ravbar, N. 2007. The Protection of Karst Waters, a Comprehensive Slovene Approach to Vulnerability and Contamination Risk Mapping, ZRC Publishing Ljubljana.
18. Vias, J. M., B. Andreo, M. J. Perles, F. Carrasco, I. Vadillo and P. Jim'enez. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the cop method: application in two pilot sites in southern spain, *Hydrology Journal* 14(6): 1-14
19. . Vrba, J. and A. Zaporozec. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Association of Hydrogeologists, Verlag, Heinz Heise.

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 22, No. 3, Fall 2018, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Evaluation and Sensitivity Analysis of COP Method Based on the RS and GIS Techniques to Determine Aquifer Vulnerability of Aleshtar Karst Plain in Lorestan Province

H. Yousefi[1*], A. Haghizadeh[2], Y. Yarahmadi[1] and P. Normohammadi[2]

(Received: February 7-2017 ; Accepted: November 14-2017)

Abstract

To determine the potential for groundwater contamination, vulnerability should be evaluated in different areas susceptible to contamination should be investigated. Aquifer (carbonate) karst or part of it is karst aquifer in the western region of Iran; due to the natural conditions of the region and human activities, they are susceptible to contamination by carbonate aquifer through holes devourer and feeding point leading to pollution. The aim of this study was to analyze aquifer vulnerability zoning map karst plain elster by using COP. This model uses three parameters including lining (O) the concentra flow(C) and precipitation regime (P) to assess the vulnerability of groundwater against pollution GIS software. The results showed that the plain with an area 7.8 km^2 was dominated in terms of vulnerability, being in the middle class. Other classes, respectively, were low with the area 18.69 km^2, high with the area 0.65 km^2 as part of the northeast plain, and much less with the area of 0.6 km^2 , The results of the sensitivity analysis also showed that at the factorization (P) due to appropriate rainfall area, the maximum impact was in determining the vulnerability of the area. And the factor (C) minimum has impact on determining the vulnerability of the area. Due to the small size of the mature karst area, the wide extent of non-karst region was shown for the verification of results related to electrical conductivity data (EC) against discharge wells in the region with the high vulnerability and moderate. A comparison was made too.

Keywords: Vulnerability, COP method, GIS, Aleshtar karst Aquifer

1. Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Lorestan, Khoram Abad, Iran.
*: Corresponding Author, Email: Hosseinyousefi@ut.ac.ir