

ارزیابی آسیب پذیری آبخوان کارستی با استفاده از مدل COP و PI (مطالعه موردی: آبخوان بیستون و پرآو)

فاطمه عمادالدین؛ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

امیر صفاری^۱؛ دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

چکیده

منابع آب کارستی قابل شرب بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک از جمله ایران به عنوان منابع آبی ارزشمند و راهبردی مطرح هستند. آلودگی آبخوان‌های کارستی تبعات جبران ناپذیری در زمینه‌های توسعه و بهداشت سکونتگاه‌های شهری و روستایی دارد بنابراین حفاظت از آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان بیستون و پرآو که به لحاظ کارستی توسعه یافته و دارای درز و شکاف و لندفرم‌های متنوع است؛ از مدل‌های آسیب‌پذیری COP و PI برای شناسایی پراکندگی پهنه‌های در معرض خطر آلودگی استفاده شده است. در این پژوهش از فاکتورهای جریان (C)، لایه‌های فوقانی (O) و بارندگی (P) در مدل COP و دو فاکتور پوشش حفاظتی (P) و شرایط نفوذ (I) در مدل PI و داده‌های کیفی آب زیرزمینی برای ارزیابی دقت مدلسازی مکانی آسیب‌پذیری استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بیشتر آبخوان کارستی بیستون و پرآو در پهنه با آسیب‌پذیری خیلی زیاد و زیاد پراکنده هستند. همچنین نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها نشان داد که هرچند مدل PI در شناسایی مناطق با آسیب‌پذیری زیاد مطابق با داده‌های کیفی آب زیرزمینی است اما مدل COP در مدلسازی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی موفق‌تر بوده است به طوری که پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا در شمال غرب، شرق و جنوب شرق منطقه با پهنه‌های آلودگی بیشتر آب زیرزمینی منطبق است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان کارستی، بیستون و پرآو، مدل COP، مدل PI، آسیب‌پذیری.

مقدمه

آبخوان‌های کارستی آب آشامیدنی یک‌چهارم از جمعیت جهان را شامل می‌شود (Ford and Williams, ۲۰۰۷). آبخوان‌های کارستی در حدود ۱۴ درصد از سطح زمین پراکنده‌اند از مهم‌ترین منابع آب زیرزمینی به شمار می‌آیند (۲۰۱۷) BGR, et al.,. جغرافیا پراکندگی پدیده‌های عینی یا ذهنی را مطالعه می‌کند. موضوعی خارج از محدوده‌ی پراکندگی نمی‌تواند موضوع جغرافیایی باشد (علیجانی، ۱۳۹۴). باوجود کاهش پوشش سطح کارستی، آبخوان‌های کارستی در زیر رسوبات ضخیم پوشیده شده‌اند و بنابراین یکی از مهم‌ترین آبخوان‌ها به شمار می‌آیند (Bakalowicz, ۲۰۰۵). ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی برای مدیریت بهره‌برداری و اندازه‌گیری‌های حفاظتی اهمیت دارند. هنگامی‌که این ویژگی‌ها نادیده گرفته شود تولید آبخوان‌های کارستی بیش‌ازحد زیاد یا ناچیز برآورد شده و به همین ترتیب بهره‌برداری زیاد یا کمی از آن‌ها صورت می‌گیرد. بعلاوه با کاهش کیفیت آب زیرزمینی حفاظت از آن‌ها کم‌اهمیت جلوه می‌کند. ساختار درونی آبخوان‌های کارستی با تجزیه‌وتحلیل شکل هیدروگراف چشمه‌های کارستی می‌تواند مطالعه شود (Vías, et al., ۲۰۰۶). اگرچه تغذیه چشمه‌های کارستی ارتباط نزدیکی به بارندگی و تغذیه رودخانه دارد (Manga, ۱۹۹۹). با توجه به طرح‌های پیش‌بینی اقلیم آینده، کاهش شدید بارندگی در موجب کاهش کیفیت و کمیت منابع آب کارستی می‌شود (Christensen, et al., ۲۰۰۷). از طرف دیگر توسعه شهری و صنعتی که همراه با افزایش رشد جمعیت است ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از ریختن مواد شیمیایی، زباله و تغییر کاربری را افزایش می‌دهد (McDonald, et al., ۲۰۱۱). آبخوان‌های کارستی بیشتر در معرض آسیب هستند زیرا سبب نفوذ سریع آب بین ایی‌کارست یا فروچاله می‌شوند که ارتباط مستقیم بین سطح و آبخوان را ایجاد می‌کنند (Ravbar and ۲۰۰۹). حفاظت از منابع آب کارست به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، یکی از مهم‌ترین اقدامات در مدیریت منابع آب کارست است (خوش اخلاق و همکاران، ۱۳۹۳؛ Afrasiabian, ۲۰۰۷). سفره‌های آب کارست به علت ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی خاص خود متمایز از دیگر سفره‌های آبی می‌باشند. سفره‌های آب کارست نسبت به آلودگی حساسیت زیادی دارند، زیرا زمان جابه‌جایی سریع و ظرفیت ذخیره‌سازی در سیستم مجرای کم است، در نتیجه دخالت فرآیندهای طبیعی مانند جذب و تخریب و فیلتراسیون تأثیر کمتری دارند (Mudarra and Andreo, ۲۰۱۱). منبع آلودگی آب‌های کارست به دو نوع اصلی منابع آلودگی منتشر یا گسترده و منابع نقطه‌ای تقسیم می‌شوند (De Jong, et al., ۲۰۰۸). مخاطرات مربوط به منابع بالقوه آلودگی آب‌های زیرزمینی، به‌طور عمده ناشی از فعالیت انسان در سطح زمین است. تحقیقات جغرافیایی در آلودگی آب‌های زیرزمینی بر دو مقوله آلودگی و منابع آلاینده توجه دارد. بر این اساس اداره عمومی علوم، تحقیقات و توسعه با حمایت اتحادیه اروپا^۱ پروژه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و خطرپذیری برای حفاظت از آبخوان‌های کربناته (کارستی) را از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ میلادی انجام دادند. دو نوع آسیب‌پذیری برای آبخوان‌های کارستی شامل آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه تشخیص داده‌شده است (Daly, et al., ۲۰۰۲). آسیب‌پذیری ذاتی استعداد آب زیرزمینی به آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد و خصوصیات هیدروژئولوژیک یک ناحیه را در نظر می‌گیرد ولی مستقل از ماهیت آلاینده و شرایط آبی آلودگی است. آسیب‌پذیری ویژه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌ها و روابط آن‌ها با سیستم هیدروژئولوژیکی را در نظر می‌گیرد.

۱. [COST: Cooperation Science and Technology]Action ۶۲۰

پژوهش‌های جغرافیایی در زمینه آلودگی آب زیرزمینی بر روی مکان‌های مختلف و منابع آلاینده متمرکز می‌کند (Dixon, ۲۰۰۵; Ravbar and Goldscheider, ۲۰۰۹; Rundquist, et al., ۱۹۹۱). با پیشرفت تکنولوژی سیستم اطلاعات جغرافیایی، پیشرفت سریعی در توانایی شناسایی و مدل‌های آلودگی آب‌های زیرزمینی و همچنین آسیب‌پذیری منابع آبی از این آلاینده‌ها صورت گرفت (Rahman, ۲۰۰۸; Babiker, et al., ۲۰۰۴). از جمله کیرسو و ژو در چین (Kirso ۲۰۰۶ and Zhou, ۲۰۰۸)، دوسی در ایتالیا (Ducci, ۲۰۰۸)، دیمیتریو و همکاران در یونان (Dimitriou, et al., ۲۰۰۸)، پلان و همکاران در استرالیا (Plan, et al., ۲۰۰۹) و راما و همکاران در آمریکای جنوبی (Rama, et al., ۲۰۲۲) به منظور بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به کار گرفته شده است. پادیل و وسپر (Padilla and Vesper, ۲۰۱۸) مطالعه جامعی در خصوص فرآیند انتقال آلاینده‌ها و رویکرد مدلسازی آبخوان کارستی با تمرکز بر انتقال آلاینده‌های بازمانده و نوظهور داشته‌اند. بررسی همکاران ۵۰ مطالعه در مورد آلودگی آبخوان کارستی با آلاینده‌های آلی نوظهور ۱ در ۲۱ کشور مرور کردند. آلاینده‌های آلی نوظهور به وضوح یک تهدید مهم برای کیفیت آب زیرزمینی کارست هستند که می‌تواند منابع آب آشامیدنی، رودخانه‌ها و سایر اکوسیستم‌های وابسته را تحت تاثیر قرار دهد (Reberski, et al., ۲۰۲۱). رنگزن و همکاران (۱۳۹۶)، به مطالعه آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی، جنوب شرق ایذه با استفاده از مدل COP پرداختند که نتایج آن‌ها که به جز بخش کوچکی از پای دماغه پلانژدار ناودیس نعل اسبی و ارتفاعات که به لحاظ آسیب‌پذیری در رده‌های کم و متوسط قرار می‌گیرند در بقیه مناطق کارست نعل اسبی آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد می‌باشد. دسترنج و همکاران (۱۳۹۶)، به ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی با استفاده از مدل COP پرداختند نتایج نشان داد که آسیب‌پذیری در ۵ طبقه به دست آمد به طوری که طبقه خیلی زیاد با مساحت ۲۲۲/۸ کیلومترمربع بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. صفاری و همکاران (۱۳۹۸)، با همپوشانی فروچاله‌های استخراج‌شده از روش فیل سینک ۲ و پهنه‌های کارستی کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی به این نتیجه رسیدند که ۷۰ درصد فروچاله‌ها در طبقه کارست با توسعه زیاد و متوسط همچنین بیش از ۹۸ درصد فروچاله‌ها در طبقات کارست سه‌گانه قرار دارند. کاشفی و همکاران (۱۳۹۹)، با ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی با استفاده از منطق فازی در آبخوان کارستی ششپیر و برغان به این نتیجه رسیدند که قرار گرفتن حدود ۹۷ درصد فروچاله‌ها در دو طبقه زیاد و متوسط کارایی مطلوب مدل فازی در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سطحی کارست در این دو آبخوان را نشان داده است. صفاری و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از ۸ فاکتور و مدل تلفیقی ترکیب خطی وزین ۳ و تحلیل شبکه‌ای ۴ مناطق مستعد توسعه کارستی توده کارستیک خورین در استان کرمانشاه را شناسایی کردند و سپس با استفاده از مدل پاپریکا ۵ به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر پرداختند. آنان نتیجه گرفتند که پتانسیل آلودگی در قسمت‌های مرکزی بیشتر از اطراف توده کارستی بوده و بافاصله از مرکز به حاشیه میزان آلودگی و آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد. همچنین ارزیابی مساحت طبقات نشان داد ۲۲/۷ کیلومترمربع از محدوده مطالعاتی دارای پتانسیل خیلی زیاد جهت و آسیب‌پذیر است. با توجه به موارد مذکور، هدف از پژوهش حاضر

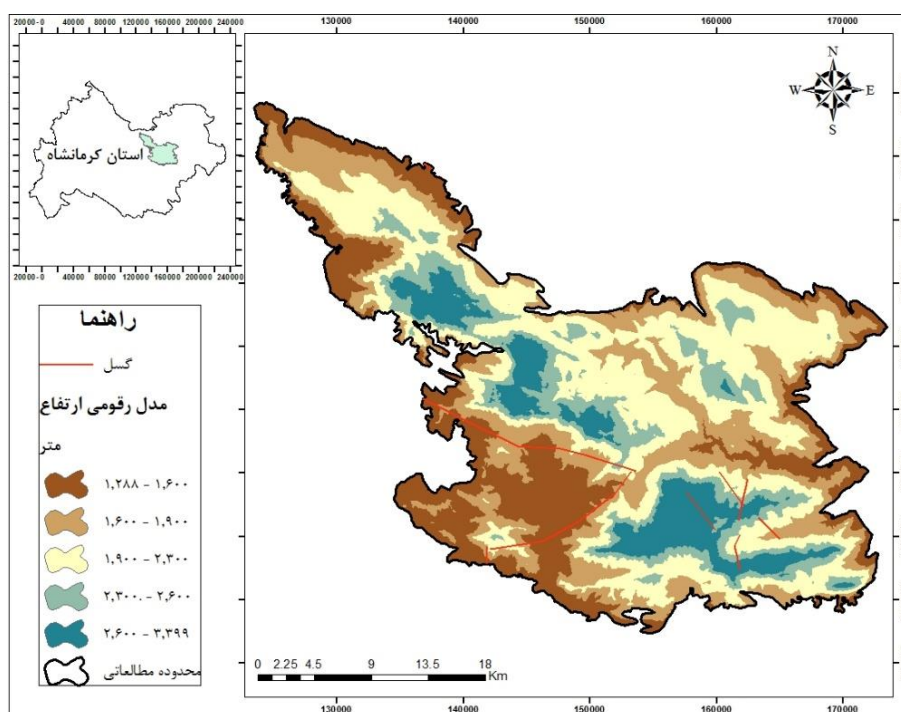
۱. EOC: Emerging organic contaminants
۲. Fill sink
۳. WLC: Weighted Linear Combination
۴. ANP: Analytic Network Process
۵. Paprika

آسیب‌پذیری آبخوان کارستی بیستون و پرآو با استفاده از مدل‌های COP و PI و سپس ارزیابی دقت شبیه‌سازی هر یک از مدل‌های آسیب‌پذیری با میزان آلودگی موجود در محیط است.

داده‌ها و روش کار

• قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان کرمانشاه و شمال شرق شهر کرمانشاه با مساحتی حدود ۹۵۳۲۸ هکتار بین عرض شمالی ۳۸ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۳ دقیقه و ۶۷ درجه و طول شرقی ۲۹ دقیقه تا ۷۲ درجه و ۴۲ دقیقه واقع شده است. درواقع توده بیستون یک توده سنگ آهکی و بخشی از زاگرس رو رانده در غرب ایران است و به ناهمواری‌های بیستون-پرآو (پرآب) معروف است. شهر کرمانشاه با شکلی کشیده در سطح یک دشت بین کوهی میان رشته‌کوه‌های پرآو در شمال شرق و رشته‌کوه‌های سفید در جنوب غرب قرار دارد (شکل ۱). زمین‌شناسی منطقه بخشی از کمربند کوهزایی زاگرس را شامل می‌شود که این بخش خود به دو جزء تقسیم گردیده شامل سنگ‌های آهکی بیستون و رادیولاریت‌ها. از نظر چینه‌شناسی در منطقه مطالعاتی در سنگ‌های آهکی رخنمون‌هایی از سنگ‌های تریاس بالایی تا کرتاسه بالایی و در رادیولاریت‌ها تریاس ژوراسیک و واحدفلیشی و در سطح دشت نهشته‌های کواترنری شامل پادگانه جدید و قدیم و مخروط‌افکنه‌های قدیمی دیده می‌شود. با توجه به اختلاف ارتفاع در سطح حوضه بارش سالانه در سطح حوضه متفاوت بوده به همین سبب میانگین بارش در ارتفاعات کم ۳۸۰ میلی‌متر و در ارتفاعات بالا به ۹۰۰ میلی‌متر می‌رسد؛ و میانگین دما در سطح حوضه ۳/۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رشته‌کوه پرآو ساختمان آهکی و آهکی-دولومیتی دارد و ارتفاع آن به ۳۴۰۰ متر می‌رسد. رودهای مهم محدوده گاماسیاب، دینور و قره‌سو هستند.



شکل(۱). موقعیت آبخوان بیستون و پرآو در استان کرمانشاه

• روش کار

در این پژوهش از مدل‌های آسیب پذیری ذاتی پرکاربرد و معروف COP و PI در محدوده پراو و بیستون استفاده شده است. بدین منظور از مدل رقومی ارتفاعی ۱ با اندازه پیکسل ۱۰ متر برای استخراج نقشه شیب، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI جهت تهیه نقشه پوشش گیاهی، نقشه واحد اراضی برای بافت خاک، نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ به‌منظور تهیه نقشه سنگ‌شناسی، نوع و موقعیت گسل‌ها و رودخانه‌ها، داده‌های ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک به‌صورت ماهانه و سالانه ایستگاه بیستون و کرمانشاه به‌منظور تهیه نقشه توزیع زمانی بارش و میزان بارندگی سالانه، نقشه خاک ۱:۱۰۰۰۰۰، کاربری اراضی ۱:۱۰۰۰۰۰ و داده‌های کیفیت آب زیرزمینی شامل نیترات و PH چشمه‌ها و چاه‌های مشاهداتی برای ارزیابی دقت مدل‌های آسیب پذیری COP و PI استفاده شده است. به‌طوری‌که ابتدا دو متغیر نقطه‌ای با استفاده از روش درون‌یابی ۲ به رستر پهنه‌ای تبدیل شده است و پس از استانداردسازی دو متغیر با هم همپوشانی و لایه نهایی کیفیت آب زیرزمینی به‌دست آمده است.

- مدل COP

مدل آسیب پذیری COP برای آبخوان‌های کارستی شامل اثرات جریان کانال و اقلیم بر آسیب پذیری طراحی شده است (White, 2002). این مدل شامل سه فاکتور اصلی شامل جریان C، لایه‌های فوقانی O و بارندگی P می‌شود. شاخص COP از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$\text{COP} = C \text{ score} \times O \text{ score} \times P \text{ score} \quad \text{رابطه (۱)}$$

برخلاف سایر مدل‌های آسیب پذیری رایج، کاهش شاخص COP نشان‌دهنده افزایش آسیب پذیری آبخوان کارستی است. جریان تمرکز (جریان آب زیرزمینی) فاکتور Cscore از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$C \text{ score} = S_f \times S_v \quad \text{رابطه (۲)}$$

که S_v شیب و پوشش گیاهی است. S_f برای آبخوان‌های تراورتن برابر ۰/۵ که نشان‌دهنده محیط کارست‌های نفوذپذیر توسعه‌یافته است؛ و مقدار ۱ برای آبخوان‌های کنگلومرا (Qb, Plk) که نشان‌دهنده واحد نفوذپذیر غیر کارستی است. فاکتور Oscore از مجموع زیر فاکتورهای خاک و لیتولوژی (رابطه ۳) به دست می‌آید.

$$O \text{ score} = O_1 + O_2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

زیر فاکتور O_1 از ترکیب بافت خاک (سیلت، رس و ...) و ضخامت خاک و زیر فاکتور O_2 نقشه سنگ‌شناسی و توسعه شکستگی‌ها محدوده مطالعه می‌باشد. که برای محاسبه زیر فاکتور OL مجموع هر سازند در ضخامت آن m ضرب شده است (رابطه ۴).

$$\text{layer Index} = \sum (l_y \times m) \quad \text{رابطه (۴)}$$

سپس در مقدار CN که نشان‌دهنده نوع آبخوان آزاد، محصور و نیمه محصور به ترتیب دارای ارزش ۱، ۱/۵ و ۲ ضرب می‌شود (رابطه ۵).

$$O_l = \text{layer Index} \times cn \quad \text{رابطه (۵)}$$

۱. DEM: Digital elevation model

۲. IDW: Inverse distance weighting

- فاکتور بارندگی Pscore

مجموع میزان بارندگی سالانه PQ (mm/year) و PI توزیع زمانی بارش است؛ که از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$P = PQ + PI \quad \text{رابطه (۶)}$$

توزیع زمانی بارندگی که نسبت کل بارندگی سالانه به تعداد روزهای بارانی است.

- مدل PI

مدل آسیب پذیری PI یک روش نقشه‌برداری آسیب پذیری که برای همه آکیفرها می‌تواند استفاده شود اما شامل پارامترهای خاصی برای آبخوان‌های کارستی است (Goldscheider, et al., ۲۰۰۰). این مدل بر اساس مدل منشأ-مسیر-هدف است. به طوری که سطح زمین منبع تولید آلاینده، آب زیرزمینی هدف و لایه‌های بین سطح زمین تا آب زیرزمینی مسیر گفته می‌شود. این روش دارای دو فاکتور پوشش حفاظتی (P) و شرایط نفوذ (I) است. فاکتور پوشش محافظ (P) شامل همه لایه‌هایی که بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی می‌شود: خاک فوقانی (از نظر بیولوژیکی بالاترین لایه پوسته زمین؛ از نظر آسیب‌شناسی افق خاک A و B)، خاک زیرین (رسوبات سبک زیر خاک و بالای سنگ‌بستر؛ رسوبات کواترنری)، سنگ‌های غیر کارستی و منطقه غیراشباع سنگ‌های کارستی می‌شود. محافظت بر اساس ظرفیت مؤثر خاک ۱، توزیع اندازه دانه خاک زیرین ۲، سنگ‌شناسی، شکاف و کارستی شدن در سنگ‌های غیر کارستی و کارستی، ضخامت همه اقلشار، میانگین تغذیه مجدد سالانه و فشار آرتزین در آبخوان برآورد می‌شود؛ که امتیاز کلی P در ۵ طبقه تقسیم‌بندی می‌شود، از $P=1$ محافظت خیلی کم تا $P=5$ محافظت خیلی زیاد و ضخامت زیاد لایه می‌شود. A مقیاس لگاریتمی اعشار بکار می‌رود بنابراین ۱۰ برابر بزرگتر از محافظت است (برای مثال ضخامت ۱۰ متر برابر با ۱ متر است) و باعث می‌شود که کلاس P یک کلاس بالاتر باشد. فاکتور P که در جدول نشان داده شده است. با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$PTS = [T + (\sum_{i=1}^m Si . Mi + \sum_{j=1}^n Bj . Mj)] . R + M \quad \text{رابطه (۷)}$$

این رابطه از روش GLA اصلاح شده به دست آمده (Holting, et al., ۱۹۹۵) که در این رابطه اثر ظرفیت زراعی خاک نوع خاک زیرین و توزیع اندازه ذرات، تغذیه خالص، لیتولوژی و تراکم شکستگی سنگ‌ها است (Zwahlen, ۲۰۰۴). PTS مجموع امتیازات پوشش حفاظتی، T خاک فوقانی، S خاک زیرین، M ضخامت هر چینه (m)، B سنگ‌بستر، R تغذیه مجدد (mm/year)، A فشار آرتزین، امتیاز B از ویژگی سنگ‌شناسی و شکستگی به دست می‌آید. امتیاز R به میزان تغذیه از جمله تفاوت بین بارندگی P و تبخیر تعرق پتانسیل ۳ وابسته است.

فاکتور I نقش مهمی برای مناطق کارستی دارد؛ که شرایط نفوذ و به خصوص درجه‌ای که پوشش محافظ در نتیجه سطح جانبی دور زده و جریان زیرسطحی که در مکان دیگری وارد آبخوان کارستی برای مثال همراه با سوراخ مکنده می‌شود را توصیف می‌کند. مقدار این فاکتور بین ۰ و ۱ است. مقدار ۱ برای خاک افقی و بسیار نفوذپذیر جایی که همه میزان تغذیه در مسیر پراکنده می‌شود برای مثال نفوذ و تراوش بعد از آن در مقابل میزان $I=0$ برای شیب‌های تند با

۱. eFC: Effective field Capacity

۲. GSD: Grain Size Distribution

۳. ETp: Potential Evapotranspiration

نفوذپذیری کم که رواناب را به سمت پایین دست می کشاند. در چنین شرایطی پوشش محافظتی از بین خواهد رفت. سایر مناطق مقادیر میانی اختصاص داده شده است (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸) که بستگی به خصوصیات خاک که فرآیندهای جریان غالب را کنترل می کنند، پوشش گیاهی، درصد شیب و موقعیت نقطه جریان پایین دست در داخل یا خارج از حوضه دارد. فاکتور I میزان عبور از سطح محافظ توسط جریان سطحی و جانبی زیر سطح را بیان می کند. این گونه جریان در حوضه آبریزهایی که جریان به منتهی فروچاله است خطرناک تلقی می شود زیرا آلودگی ها می توانند مستقیماً وارد آب های زیرزمینی کارست شوند. مفهوم هیدرولوژیکی شامل هدایت هیدرولیکی و کمترین عمق لایه های نفوذپذیر در خاک است. نفوذ یک فرآیند غالبی است زمانی که هدایت هیدرولیکی لایه خاک فوقانی بیشتر از ۵-۱۰ متر بر ثانیه و ضخامت بیشتر از ۱۰۰ سانتی متر باشد. فاکتور I بیانگر نفوذ مستقیم نسبت به جریان سطحی و جانبی زیرسطحی است که عوامل کنترل کننده شامل ویژگی های خاک، شیب و پوشش گیاهی می شود. به طور کلی کاربری جنگل میزان قابل توجهی از جریان نفوذ می کند در حالی که مناطق کشاورزی به احتمال زیاد رواناب سطحی تولید می کنند. سرعت جریان زیرسطحی قابل اندازه گیری با استفاده از قانون داریسی است (به جز جریان استثنایی) و رابطه مستقیم با درجه شیب جریان دارد. این فاکتور بر اساس جدول ۱، ۲ و ۳ به دست می آید:

جدول (۱). مرحله اول تعیین خصوصیات خاک

عمق لایه خاک نفوذپذیر			
> ۱۰۰ سانتی متر	۱۰۰-۳۰ سانتی متر	< ۳۰ سانتی متر	ویژگی خاک
A	C	D	>۴-۱۰
	B		۵-۱۰-۴-۱۰
E			متر/ثانیه ۵-۱۰-۶-۱۰
F			<۶-۱۰

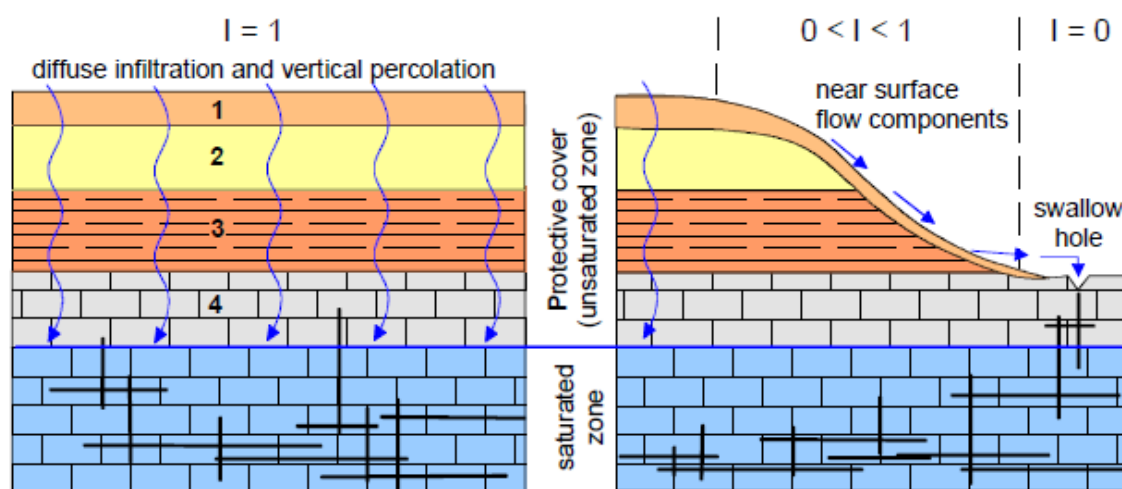
جدول (۲). مرحله دوم تعیین کاربری جنگل، مرتع و زمین کشاورزی

کاربری جنگل			کاربری مرتع، زمین کشاورزی			ویژگی خاک
شیب			شیب			
> ۲۷٪	۳۷-۲۷٪	< ۵٪	> ۲۷٪	۳۷-۲۷٪	< ۵٪	
۱	۱	۱	۰/۸	۱	۱	A
۰/۶	۰/۸	۱	۰/۴	۰/۶	۱	B
۰/۴	۰/۶	۱	۰/۲	۰/۴	۱	C
۰/۴	۰/۶	۰/۸	۰/۲	۰/۴	۰/۶	D
۰/۴	۰/۶	۱	۰/۲	۰/۴	۰/۸	E
۰/۲	۰/۴	۰/۸	۰	۰/۲	۰/۶	F

جدول (۳). تعیین فاکتور I

فاکتور I						نقشه سطح حوضه
۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	چاه مکنده، جریان سینک هول، بافر ۱۰ متر
۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰	بافر ۱۰۰ متر
۱	۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	جریان سینک هول حوضه
۱	۱	۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	دیگر قسمت‌های حوضه

نقشه حوضه آبریز سطحی که نشان‌دهنده مناطق حوضه سطحی که جریان منتهی به فروچاله از طریق چاه مکنده ناپدید می‌شود و بافر در دو سمت جریان‌های منتهی به فروچاله ۱۰ متر و ۱۰۰ متر است. میزان جریان سطحی و زیرسطحی بستگی به شدت بارندگی و ویژگی‌های منطقه دارد. ویژگی‌های هر رخداد مثل سرعت بارندگی نمی‌تواند به‌عنوان آسیب پذیری باشد مگر اینکه برای بارندگی یک نقشه آسیب پذیری متفاوت ترسیم کنیم؛ بنابراین، نسبت جریان سطحی و نزدیک سطح فقط بر اساس ویژگی‌های منطقه و با فرض متوسط طوفان بارش که ممکن است چندین بار در سال رخ دهد، تخمین زده می‌شود (شکل ۲).



شکل (۱). مدل آسیب پذیری آبخوان PI، فاکتور P اثر پوشش محافظ را به‌عنوان تابعی از ضخامت و نفوذپذیری تمام طبقات بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی در نظر می‌گیرد. پوشش محافظ شامل حداکثر چهار لایه است: ۱. خاک سطحی ۲. زیر خاک ۳. سنگ‌بستر غیر کارستی ۴. سنگ‌بستر کارستی غیراشباع. فاکتور I بیانگر درجه‌ای است که پوشش محافظ توسط جریان سطحی و نزدیک به سطح، بخصوص در حوضه آبریز با جریان سینک هول

آسیب پذیری آبخوان کارستی PI حافظت نهایی از فاکتورهای P و I به دست می‌آید؛ که میزان آسیب پذیری در ۵ طبقه شناسایی شده است و با رنگ‌های مختلف نشان داده می‌شود. میزان کمتر یا برابر با ۱ حفاظت خیلی کم و آسیب پذیری خیلی زیاد از آلوده‌کننده‌ها که آب رنگ قرمز نشان داده شده است. میزان برابر با ۵ حفاظت خیلی زیاد و آسیب پذیری خیلی کم که با رنگ روشن نشان داده می‌شود (جدول ۴).

جدول (۴). راهنمای تهیه نقشه آسیب پذیری PI و فاکتورهای P و I (Goldscheider, ۲۰۰۵)

فاکتور I		فاکتور P		نقشه آسیب پذیری PI	
کیفی	کمی	کیفی	کمی	کیفی	کمی
خیلی زیاد	۰-۰/۲	خیلی کم	۱	خیلی زیاد	۱-۰
زیاد	۰/۴	کم	۲	زیاد	۲-۱
متوسط	۰/۶	متوسط	۳	متوسط	۳-۲
کم	۰/۸	زیاد	۴	کم	۴-۳
خیلی کم	۱	خیلی زیاد	۵	خیلی کم	۵-۴

شرح و تفسیر نتایج

به منظور ارزیابی آسیب پذیری آبخوان بیستون و پرآو نقشه فاکتورهای مدل cop و PI بدست آمد. همچنین نتایج ارزیابی دقت مدل های آسیب پذیری در زیر ارائه شده است.

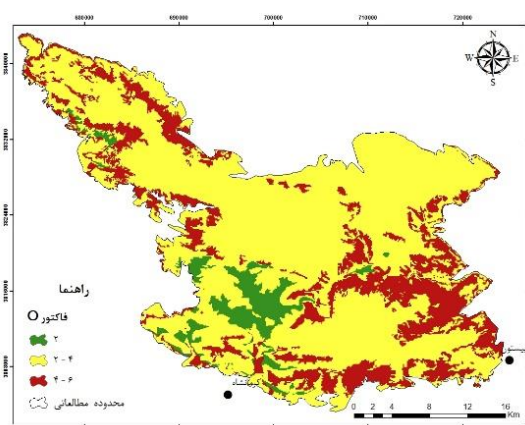
• نتایج مدل cop

فاکتور C که نشان دهنده ویژگی های سطحی (Sf)، شیب و پوشش گیاهی (Sv) است. زیر فاکتور ویژگی های سطحی با توجه به اینکه محدوده مطالعه از آبخوان تراورتن تشکیل شده برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. همچنین با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متر مستخرج از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ نقشه شیب محدوده مطالعه در چهار طبقه ۰ تا ۸، ۸ - ۳۱، ۳۱ تا ۷۶ و بیشتر از ۷۶ به دست آمد که بیشتر محدوده مطالعه در طبقه ۳۱ تا ۷۶ است (شکل ۳). با همپوشانی نقشه شیب و پوشش گیاهی فاکتور Sv در محدوده مطالعه تهیه و در نهایت با استفاده از رابطه ۲ نقشه تمرکز جریان (C) در ۵ طبقه به دست آمد که طبقه ۱ - ۰/۸ با تمرکز جریان کم در شمال شرق محدوده ۰/۸ - ۰/۶، ۰/۶ - ۰/۴، ۰/۴ - ۰/۲ و ۰/۲ - ۰-۰/۲ به دست آمد.

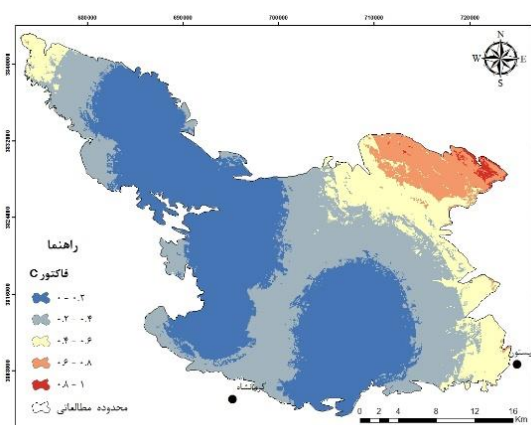
فاکتور O با استفاده از نقشه خاک و زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مطالعه به دست آمد که مجموع این دو زیر فاکتور بیانگر درجه حفاظت آبخوان با استفاده از لایه های پوشاننده است. بافت و ضخامت خاک محدوده مطالعاتی مشخص کرد که عمده بافت خاک محدوده مطالعه لومی رسی و توده آهکی ضخیم لایه است؛ و با استفاده از نقشه لیتولوژی و شکستگی، ضخامت سازندها موجود در محدوده با استفاده از نیمرخ زمین شناسی محاسبه شد سپس به هر یک از سازندها بر اساس میزان تأثیری که بر آسیب پذیری آبخوان دارند ارزشی تعلق می گیرد به این صورت که هر چه میزان ضخامت بیشتر باشد به آن لایه ارزش کمتری در نظر گرفته می شود و هرچه ضخامت سازند کمتر باشد امکان آلایندهی آبخوان بیشتر است و ارزش بیشتری در نظر گرفته می شود چراکه امکان آلودگی آبخوان بیشتر است به همین دلیل سازند بیستون دارای بیشترین ضخامت (۳۰۰ متر) است ارزش ۱ و نهشته های آبرفتی دوره کواترنر که ضخامت کمی (۲۰۰ متر) دارند ارزش ۱۰ در نظر گرفته شده است. سپس ضخامت هر سازند در ارزشی که به آن متعلق است ضرب شده است و در مرحله بعد با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی دارای آبخوان آزاد است زیر فاکتور Ol به دست آمد و از همپوشانی

نقشه خاک و لیتولوژی و شکستگی نقشه فاکتور O در سه طبقه شامل طبقه ۲ با ارزش حفاظتی کم، ۴-۲ ارزش حفاظتی متوسط و ۸-۴ با ارزش حفاظتی زیاد تهیه شد (شکل ۴).

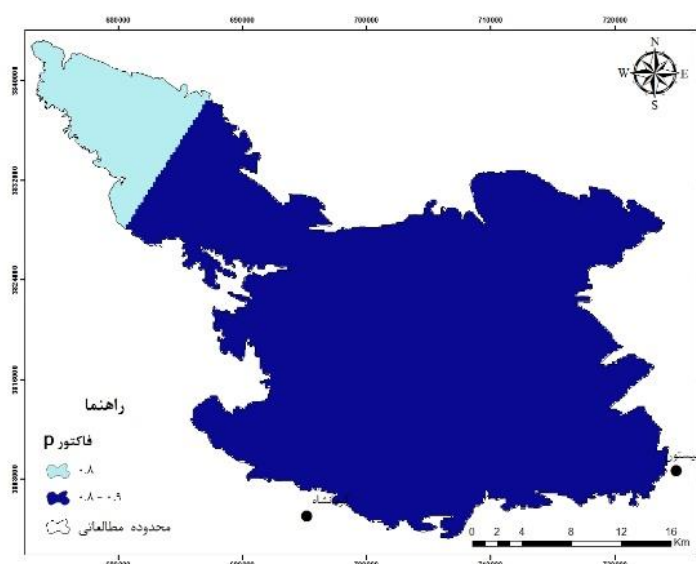
فاکتور P که توزیع زمانی بارش به همراه شدت و مدت بارش می‌تواند توانایی بارش را برای انتقال مواد آلاینده از سطح به آب زیرزمینی را نشان دهد. به همین جهت ابتدا توزیع زمانی بارش برای محدوده کمتر از ۱۰ میلی‌متر در روز که ارزش آن ۰/۵ و ۱/۶ در نظر گرفته شد و میزان بارندگی سالانه ۴۳۵ میلی‌متر در سال برای محدوده مطالعاتی به دست آمد که برابر ارزش ۰/۳ است؛ و با استفاده از رابطه ۵ نقشه فاکتور بارش P در ۲ طبقه ۰/۸ در شمال غرب محدوده مطالعه و ۰/۹-۰/۸ با ارزش حفاظتی کم طبقه شد (شکل ۵).



شکل (۲). نقشه پهنه‌بندی فاکتور O

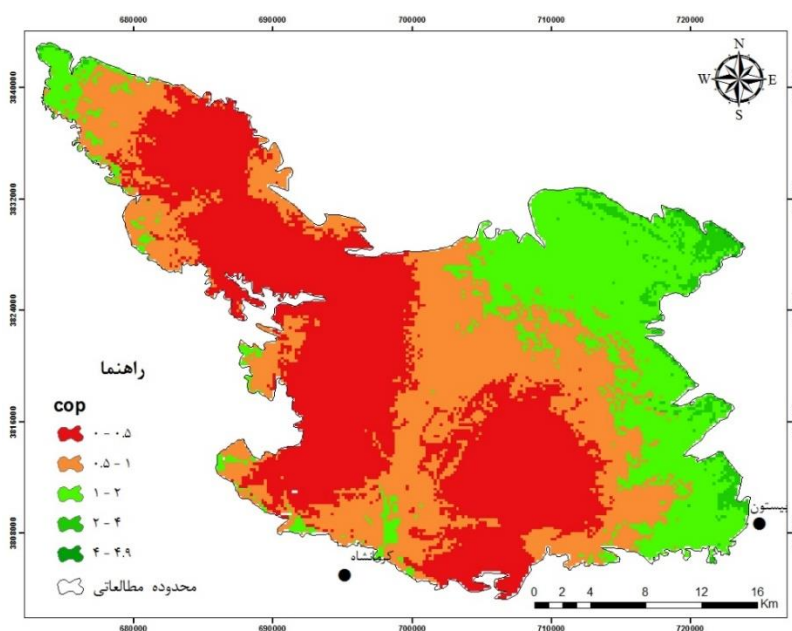


شکل (۳). نقشه پهنه‌بندی فاکتور C



شکل (۴). نقشه پهنه‌بندی فاکتور P

نقشه آسیب پذیری COP با ترکیب سه نقشه فاکتورهای O, C و P برای محدوده مطالعه در ۵ کلاس به دست آمد (شکل ۶). کلاس با آسیب پذیری خیلی زیاد (۰-۰/۵) برابر ۳۸۷۷۴.۷۴ هکتار و ۴۱/۴ درصد بیشترین مساحت و کلاس با آسیب پذیری خیلی کم (۴-۴/۹) با ۵۷.۸۶ هکتار و ۰/۰۶ درصد کمترین مساحت در محدوده مطالعاتی را دارند (جدول ۵).



شکل (۴). نقشه آسیب پذیری آبخوان کارستی مدل COP

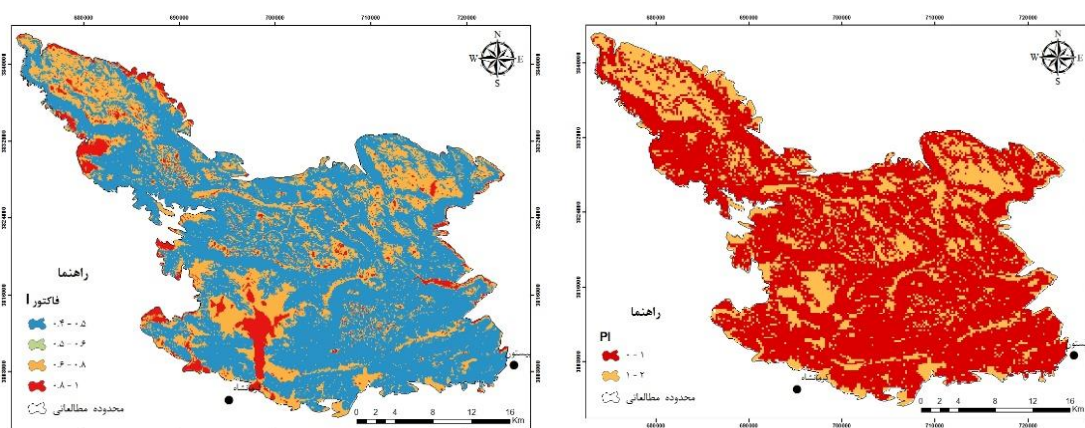
جدول (۵). مساحت و درصد آسیب پذیری آبخوان کارستی با مدل COP

درصد	مساحت (ha)	شاخص COP	کلاس آسیب پذیری
۴۱/۴	۳۸۷۷۴/۷۴	۰ - ۰/۵	خیلی زیاد
۳۲/۵	۳۰۴۸۴/۷۳	۰/۵ - ۱	زیاد
۲۳/۴	۲۱۸۸۹/۶۴	۱ - ۲	متوسط
۲/۵	۲۳۱۴/۰۷	۲ - ۴	کم
۰/۰۶	۵۷/۸۶	۴ - ۴/۹	خیلی کم

• نتایج مدل PI

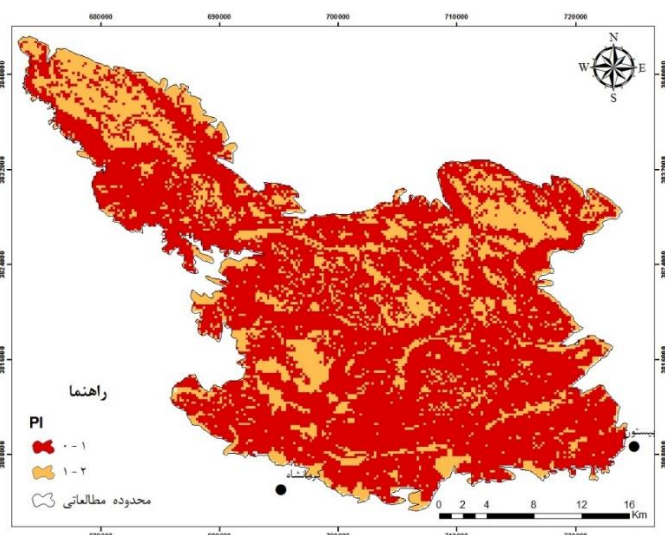
فاکتور پوشش محافظ P از نقشه خاک، بارندگی و زمین‌شناسی استفاده شده است. زیر فاکتور خاک فوقانی T وابسته به ظرفیت مؤثر خاک است که با استفاده از نقشه خاک منطقه امتیاز T خاک فوقانی برای خاک عمیق تا نیمه عمیق بیشترین امتیاز برابر ۲۵۰، برای خاک نیمه عمیق ۱۲۵ و خاک کم عمق امتیاز ۵۰ در نظر گرفته شده است. میزان تغذیه آبخوان R با استفاده از بارش سالانه و درز و شکاف محدوده به دو پهنه تقسیم شد. میزان تغذیه آبخوان با امتیاز آن رابطه معکوس دارد به طوری که برای بیشتر محدوده مطالعاتی با تغذیه ۱۵۰ میلی‌متر امتیاز ۱/۵ و پهنه شمال غربی با تغذیه ۲۵۰ میلی‌متر برابر ۱/۲۵ دارد. خاک زیرین با توجه به بافت خاک برای خاک لومی رسی امتیاز ۲۵۰ و بقیه منطقه امتیاز ۱۴۰ در نظر گرفته شد. زیر فاکتور لیتولوژی L برای سنگ‌های آهکی امتیاز ۵ و برای سنگ‌های غیر آهکی امتیاز ۲۰ اختصاص داده شد. تراکم شکستگی F برای سنگ‌های کارستی با انسداد متوسط امتیاز ۰/۵ و مناطق بدون شکستگی با امتیاز ۱۰ نشان داده شد. نقشه سنگ‌بستر B از ترکیب زیر فاکتورهای لیتولوژی و شکستگی‌های در محدوده مطالعاتی

به‌دست آمده است. میزان فشار آرتزین A برابر ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی فاکتور P را در دو طبقه ۱ (خیلی کم) و ۲ (کم) را نشان می‌دهد؛ که بیشتر محدوده مطالعاتی در طبقه کم قرار گرفته است. فاکتور شرایط نفوذ (I) با استفاده از خصوصیات خاک، لایه شیب و کاربری منطقه مطالعه به دست آمد (شکل ۸). بیشترین کاربری در محدوده مطالعه مرتع و از نظر خصوصیات خاک محدوده مطالعه گروه خاک C با بیشترین مساحت ۹۰۸۷۶ هکتار وجود دارد. همچنین شیب محدوده مطالعه بین صفر تا ۴۰۷ درصد است که بیشتر محدوده شیب بالاتر از ۲۷ درصد دارد. شکل ۸ پهنه‌بندی فاکتور I را در چهار طبقه زیاد (۰/۴ - ۰/۵)، متوسط (۰/۶ - ۰/۵)، کم (۰/۸ - ۰/۶)، خیلی کم (۱ - ۰/۸) را نشان می‌دهد که با توجه به شیب زیاد محدوده طبقه زیاد بیشترین پراکندگی را دارد که سبب کاهش پوشش محافظتی می‌شود.



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی فاکتور I

شکل (۷). نقشه پهنه‌بندی فاکتور P



شکل ۶. نقشه آسیب پذیری آبخوان کارستی مدل PI

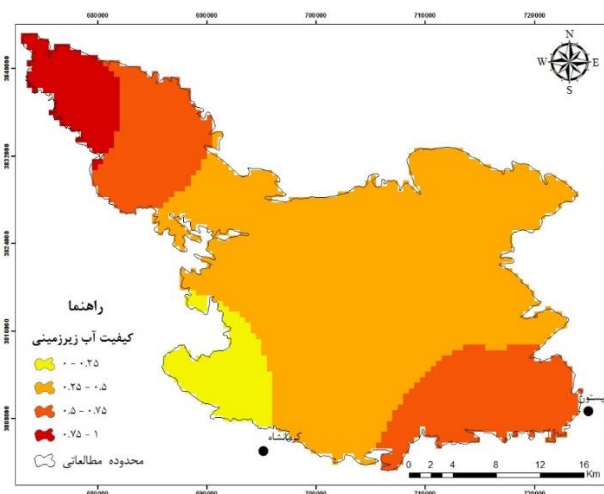
نقشه آسیب پذیری PI از تلفیق دو فاکتور P و I در دو طبقه برای محدوده بیستون و پرآو به‌دست آمده است (شکل ۹). طبقه با آسیب پذیری خیلی زیاد (۱ - ۰) با بیشترین مساحت حدود ۶۸۷۸۳ هکتار و ۷۲/۹ درصد در سرتاسر محدوده مطالعاتی پراکنده شده و طبقه با آسیب پذیری زیاد (۲ - ۱) با مساحت حدود ۲۵۵۲۶ هکتار و ۲۷ درصد نشان داده شده است (جدول ۶).

جدول (۱). مساحت و درصد آسیب پذیری آبخوان کارستی با مدل PI

کلاس آسیب پذیری	شاخص PI	مساحت (ha)	درصد
خیلی زیاد	۰ - ۱	۶۸۷۸۳	۷۲/۹
زیاد	۱ - ۲	۲۵۵۲۶	۲۷

• ارزیابی دقت مدل‌های آسیب پذیری

برای ارزیابی دقت خروجی مدل‌های آسیب پذیری آبخوان کارستی COP و PI از متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی نیترات و PH استفاده شد. نیترات از چندین منبع مختلف از جمله کودهای نیتروژن معدنی و کود حیوانی در کشاورزی، فاضلاب خانگی یا صنعتی نیتروژن دار، رسوب اتمسفر، کانی سازی نیتروژن آلی خاک و تثبیت نیتروژن بیولوژیکی می‌تواند سبب آلودگی شود (Padilla and Vesper, ۲۰۱۸; Kendall and Aravena, ۲۰۰۰). از ایزوتوپ‌های ^{15}N و ^{18}O صرف نظر از مقیاس زمانی و جغرافیایی برای ردیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند (Yang, et al., ۲۰۱۹). مقادیر بالا این متغیرها نشان‌دهنده آلودگی منابع کارستی است. نقشه شکل ۱۰ پراکندگی مکانی آلودگی آب‌های زیرزمینی را بر اساس دو متغیر مذکور در چهار طبقه نشان می‌دهد. طبقه ۰/۵ تا ۱ در جنوب شرق تا شمال غرب محدوده مطالعاتی پراکنده است. طبقه ۰ تا ۰/۲۵ کمترین پراکندگی در آبخوان کارستی بیستون و پروا دارد. این نقشه به صورت ترکیب دو متغیر و استاندارد شده ارائه شده است. همپوشانی مکانی نقشه‌های آسیب‌پذیری با نقشه آلودگی آب زیرزمینی نشان می‌دهد مدل COP بهتر توانسته آسیب‌پذیری آبخوان مدل‌سازی نماید به طوری که پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا در شمال غرب منطقه و شرق و جنوب شرق منطقه با پهنه‌های آلودگی بیشتر آب زیرزمینی منطبق است. هرچند مدل PI هم مناطق با آسیب‌پذیری زیاد در شمال غرب منطقه با آسیب‌پذیری خیلی زیاد در محدوده مطالعاتی نشان داده است.



شکل (۱۰). پراکندگی آلودگی آب زیرزمینی بیستون و پروا

نتیجه‌گیری

در بعضی کشورها به‌ویژه خاورمیانه تنها منبع آب شیرین قابل شرب، آبخوان‌های کارستی می‌باشند. آبخوان‌های کارستی به سبب سرعت حرکت از نظر آلودگی آسیب‌پذیر هستند. به‌طور عمده آلودگی آب‌های زیرزمینی، ناشی از فعالیت انسانی در سطح زمین است. بنابراین حفاظت از منابع آب کارستی به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، اهمیت

ویژه‌ای جهت مدیریت منابع آب کارست دارد. از اواخر دهه ۱۹۶۰ مدل‌های ارزیابی آسیب پذیری مختلفی برای مدیریت و حفاظت آب‌های زیرزمینی به‌طور گسترده بکار می‌رود. تعدادی از مدل‌های مشهور آسیب پذیری کیفی شامل PI، COP، GLA، EPIK، DRASTIC و ... می‌شوند.

محدوده مطالعاتی بیستون و پراو با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی و اقلیم گذشته اشکال کارستی خاصی از جمله غارهای مختلف، اوالا، دولین و لاپیه با حجم آبدهی بالا تشکیل شده است. با توجه به وسعت و تراکم عوارض کارستی در محدوده مطالعاتی بیستون و پراو، نقش مهمی در نفوذ آب و جذب نزولات جوی دارند؛ بنابراین ضرورت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی بیستون و پراو را نشان می‌دهد.

در این پژوهش بر اساس مدل‌سازی مکانی در محیط GIS به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی بیستون و پراو با استفاده از مدل COP و PI پرداخته شد. در نهایت جهت ارزیابی دقت و مقایسه هر یک از مدل‌های آسیب‌پذیری COP و PI نقشه کیفیت آب زیرزمینی از نظر نیترات و PH تهیه و با نتایج هر یک از مدل‌های آسیب‌پذیری مقایسه شد. خروجی‌های این پژوهش نشان می‌دهد عملکرد شبیه‌سازی هر یک از مدل‌های آسیب‌پذیری COP و PI با میزان آلودگی موجود در محیط ارتباط بسیار نزدیکی دارد. به نظر می‌رسد مدل آسیب‌پذیری COP بهتر و با دقت بیشتری توانسته میزان آسیب‌پذیری را در آبخوان کارستی بیستون و پراو نشان دهد.

در پژوهش حاضر آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دشت کرمانشاه و بیستون و پراو با نگاه تطبیقی با دو مدل آسیب-پذیری COP و PI انجام شد که در مقایسه پژوهش‌های انجام‌شده قبلی از جمله ملکی و همکاران (۱۳۹۸)، نشان می‌دهد آسیب‌پذیری آبخوان کارستی بیستون و پراو افزایش چشم‌گیری داشته و مؤید کاهش کیفیت آب زیرزمینی در سال‌های اخیر است؛ بنابراین نظارت پیوسته و مطالعات بیشتری را در زمینه کیفیت آب زیرزمینی جهت حفاظت از منابع آب کارستی بیستون و پراو را می‌طلبد. از طرف دیگر مدل‌سازی آسیب‌پذیری می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ارزشمند جهت مدیریت کیفیت منابع آب کارستی مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود پهنه‌هایی از آبخوان کارستی بیستون و پراو که لند فرم‌هایی از جمله دولین، پونور، اوالا و غیره دارد به‌عنوان پهنه‌های حفاظت‌شده تعریف شوند تا امکان مدیریت کیفیت آبخوان و کاهش آسیب‌پذیری آن میسر گردد.

منابع

- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ سجاد باقری سید شکری و طاهر صفرراد. ۱۳۹۳. واکاو تأثیرگذاری خشکسالی‌های شدید بر آبدهی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه (مطالعه موردی: خشکسالی شدید سال ۸۷-۸۶). *فضای جغرافیایی*، ۴۸: ۱۹-۱.
- دسترنج، علی؛ احمد نوحه‌گر، آرشد ملکیان، حمید غلامی و مریم جعفری اقدام. ۱۳۹۶. ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان کارستی دالاهو. *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۲: ۱۶-۱.
- رنگزن، کاظم؛ علی محرابی نژاد، فرشاد علیجانی و زهره استاد هاشمی. ۱۳۹۶. آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی، جنوب شرق ایذه، با استفاده از روش COP. *زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، ۱: ۲۸-۲۰.
- صفاری، امیر؛ طیبه کیانی و ساسان زنگنه تبار. ۱۳۹۸. بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۵۵: ۳۶-۲۳.
- صفاری، امیر؛ علی احمدآبادی و تینا پی‌سوزی. ۱۴۰۰. ارزیابی و تحلیل مناطق کارستیک توسعه‌یافته و آسیب‌پذیر (مطالعه موردی: توده کارستیک خورین در استان کرمانشاه). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۳: ۲۰۰-۱۸۹.
- علیجانی، بهلول. ۱۳۹۴. تحلیل فضایی. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۳: ۱-۱۴.

- کاشفی، مهدی؛ مژگان انتظاری و مریم جعفری اقدم. ۱۳۹۹. ارزیابی آسیب پذیری کارست سطحی آبخوان‌های کارستی ششپیر و برغان با استفاده از منطق فازی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۴: ۶۲-۴۷.
- ملکی، امجد؛ سجاد باقری سید شکری و سارا مطاعی. ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی دشت کرمانشاه و توده بیستون-پراو با استفاده از مدل COP. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۵۲: ۱۴۵-۱۲۹.
- Afrasiabian, A. ۲۰۰۷. The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran. *Environmental drinking*, ۴: ۶۷۳-۶۷۷.
- Andreo, B.; and F. Carrasco. ۲۰۰۸. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, ۵: ۹۱۱-۹۲۵.
- Babiker, I S.; Mohamed A, Terao. H, Kato. K, and Ohta. K. ۲۰۰۴. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. *Environment International*, ۸: ۱۰۰۹-۱۰۱۷. Doi: ۱۰.۱۰۱۶/S۰۱۶۰-۴۱۲۰(۰۳)۰۰۰۹۰۳.
- Bakalowicz, M. ۲۰۰۵. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology*. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-002-9>.
- BGR.; IAH, KIT, and UNESCO. ۲۰۱۷. World Karst Aquifer Map, ۱:۴۰ ۰۰۰ ۰۰۰. Berlin, Reading, Karlsruhe and Paris.
- Christensen, Jens Hesselbjerg.; Bruce. Hewitson, and Aristita. Busuioic. ۲۰۰۷. Regional climate projections. In *Climate Change ۲۰۰۷: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group ۱ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., and New York, ۸۴۹,۹۲۶.
- Daly, D.; Alain. Dassargues, David. Drew, S. Dunne, Nico. Goldscheider, S. Neale, Ileana Cristina. Popescu, and Francois. Zwahlen. ۲۰۰۲. Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology*, ۲: ۳۴۰-۳۴۵. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0185-1>.
- De Jong, C.; S. Cappy, M. Finckh, and D. Funk. ۲۰۰۸. A transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco. *Engineering Geology*, ۳: ۲۲۸-۲۳۸. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.021>
- Dimitriou, Elias.; Ioannis. Karaouzas, Konstantinos. Sarantakos, Ierotheos. Zacharias, Konstantinos. Bogdanos, and Aristidis. Diapoulis. ۲۰۰۸. Groundwater risk assessment at a heavily industrialised catchment and the associated impacts on a peri-urban wetland. *Environmental Management*, ۳: ۵۲۶-۵۳۸. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.019>
- Dixon, B. ۲۰۰۵. Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, ۴: ۳۲۷-۳۴۷. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.07.002>
- Ducci, Daniela. ۲۰۰۸. Contamination risk of the Alburni Karst System (southern Italy). *Geological Society*, ۱: ۱۳۷-۱۵۱.
- Ford, Derek.; and Paul. Williams. ۲۰۰۷. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Second edition, Wiley, Chichester, the United States, DOI: ۱۰.۱۰۰۲/۹۷۸۱۱۱۸۶۸۴۹۸۶
- Goldscheider, N.; M. Klute, S. Sturm, and H. Hotzl. ۲۰۰۰. The PI Method - a GIS-Based Approach to Mapping Groundwater Vulnerability with Special Consideration of Karst Aquifers. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, ۴۶: ۱۵۷-۱۶۶.
- Goldscheider. Nico. ۲۰۰۵. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology*, ۴: ۵۵۵-۵۶۴. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s10040-003-0291-3
- Holting, B.; T. Haertle, K.H. Hohberger, H. Ecki, J. Hahn, and C. Koldehoff. ۱۹۹۵. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der rundwasser_berdeckung [Concept for the evaluation of the protective function of the layers overlying groundwater]. *Geologisches Jahrbuch*, ۶۳: ۵-۲۴.
- Kavouri, Konstantina.; Valerie. Plagnes, Joel. Tremoulet, Nathelie. Dörfliger, Faycal. Rejjiba; and Pierre. Marchet. ۲۰۱۱. PaPRIKA: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology*. ۱۹: ۳۳۹-۳۵۳. Doi. ۱۰.۱۰۰۷/s10040-010-0688-۸
- Kendall, Carol.; and Ramon. Aravena. ۲۰۰۰. *Nitrate isotopes in groundwater systems*. Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Springer, Boston, MA https://doi.org/10.1007/978-1-4610-4557-6_9.
- Kirso, M.; and Y.Zhou. ۲۰۰۶. GIS-based vulnerability assessment and mapping for the protection of the Dire Dawa groundwater basin. Ethiopia, ۳rd Congress of international association of hydro geologists, Beijing, P.R. China. Oct ۹-۱۳.
- Manga, M. ۱۹۹۹. On the timescales characterizing groundwater discharge at springs. *Hydrology*, ۱-۲: ۵۶-۶۹. [https://doi.org/10.1016/S۰۰۲۲-۱۶۹۴\(۹۹\)۰۰۰۴۴-X](https://doi.org/10.1016/S۰۰۲۲-۱۶۹۴(۹۹)۰۰۰۴۴-X)
- Mangin, A. ۱۹۷۵. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. University of Dijon, France (PhD Thesis).

- McDonald, R. I.; I. Douglas, C. Revenga, R. Hale, N. Grimm, and J. Gronwall. ۲۰۱۱. Global urban growth and the geography of water availability, quality, and delivery. *AMBIO*, ۲۰: ۴۳۷-۴۴۶. Doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۳۲۸۰-۰۱۱-۰۱۰۲-۶.
- Mudarra, M.; and B. Andro. ۲۰۱۱. Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). *Hydrology*, ۳: ۶۳-۷۸. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.005>
- Nestler, Angelika.; Michael. Berglund, Frederik. Accoe, Steluta. Duta, Dongmi. Xue, P. Boeckx, and P. Taylor. ۲۰۱۱. Isotopes for improved management of nitrate pollution in aqueous resources: review of surface water field studies. *Environment Science*, ۱۸: ۵۱۹-۵۳۳. <https://doi.org/10.1007/s113۵6-۰۱۰-۰۴۲۲-z>.
- Padilla, I.Y.; and D.J. Vesper. ۲۰۱۸. Fate, transport, and exposure of emerging and legacy contaminants in karst systems: state of knowledge and uncertainty. *Karst Science*, ۳۳-۴۹ https://doi.org/10.1007/978-۳-۳۱۹-۰۱۰۷۰-۵_۵.
- Plan, L.; K. Decker, R. Faber, M. Wagreich, and B. Grasemann. ۲۰۰۹. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Environmental Geology*, ۲: ۲۸۵-۲۹۷.
- Rahman, A. ۲۰۰۸. A GIS based Drastic model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, ۱: ۳۲-۵۳.
- Rama, Fabrizio.; Busico. Gianluigi, Arumi. José Luis, Kazakis. Nerantzis, Colombani. Nicolò, Luigi. Marfella, Ricardo. Hirata, Eduardo. E. Kruse, Paul. Sweeney, and Micòl. Mastrocicco. ۲۰۲۲. Assessment of intrinsic aquifer vulnerability at continental scale through a critical application of the drastic framework: The case of South America. *Science of The Total Environment*, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153748.
- Ravbar, N.; and N. Goldscheider ۲۰۰۹. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeology*, ۱۷: ۷۲۵-۷۳۳.
- Reberski, Jasmina Luka.; Josip. Terzić; Louise. D. Maurice, and Dan. J. Lapworth. ۲۰۲۱. Emerging organic contaminants in karst groundwater: A global level assessment. *Hydrology*, ۱-۳: ۱۲۷-۲۴۲. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421012920>.
- Rundquist, D. C.; A. J. Peters, L. Di, D. A. Rodekahr, R. L. Ehrman, and G. Murray. ۱۹۹۱. Statewide groundwater-vulnerability assessment in Nebraska using the drastic/GIS model. *Geocarto International*, ۲: ۵۱-۵۸.
- Van Brahana, J. ۲۰۰۸. *Karst aquifers*. Encyclopedia of water science (۲nd Ed). <http://www.informaworld.com/10.1081/E-EWS2-120010039>.
- Van Burkalow, A. ۱۹۵۹. The Geography of New York City's water supply: a study of interactions. *Geography Review*, ۳: ۳۶۹-۳۸۶.
- Vías, J.M.; B. Andro, M.J. Perles, F. Carrasco, I. Vadillo, and P. Jiménez. ۲۰۰۶. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology*, ۶: ۹۱۲-۹۲۵. <https://doi.org/10.1007/s1004۰۰۰۶-۰۰۲۳-۶>.
- White, W.B. ۲۰۰۲. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*. ۶۵: ۸۵-۱۰۵.
- Yang, Pingheng.; Ying. Li, Chris. Groves, and Aihua. Hong. ۲۰۱۹. Coupled hydro geochemical evaluation of a vulnerable karst aquifer impacted by septic effluent in a protected natural area. *Science of the Total Environment*, ۶۵۸: ۱۴۷۵-۱۴۸۴
- Zwahlen, F. ۲۰۰۴. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST action ۶۲۰), European Commission, Directorate-General XII Science. Res. Dev. Brussels. [https://doi.org/10.1016/S088۵-۲۰۱۴\(۰۰\)۰۰۳۰-۷](https://doi.org/10.1016/S088۵-۲۰۱۴(۰۰)۰۰۳۰-۷).