نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال نهم، شماره ٤، زمستان١٤٠١

صفحات ٤١ - ٥٦

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[1]؛ دانشیار ژئومورفولوژِی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

دریافت مقاله :۱۴۰۱/۰۹/۰۵ پذیرش نهایی:۱۴۰۱/۱۲/۱۳

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 PIبرای شناسایی پراکندگی پهنه‌های در معرض خطر آلودگی استفاده شده است. در این پژوهش از فاکتورهای جریان (C)، لایه های فوقانی (O) و بارندگی (P) در مدلCOP 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 آسیب پذیری خیلی زیاد و زیاد پراکنده هستند. همچنین نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها نشان داد که هرچند مدل PI در شناسایی مناطق با آسیب پذیری زیاد مطابق با داده های کیفی آب زیرزمینی است اما مدل COP در مدلسازی آسیب پذیری آبخوان کارستی موفق تر بوده است به طوری که پهنه های با آسیب پذیری بالا در شمال غرب، شرق و جنوب شرق منطقه با پهنه های آلودگی بیشتر آب زیرزمینی منطبق است.

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

۱ . نویسنده مسئول: Email: saffari@khu.ac.ir

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

مقدمه

آبخوان‌های کارستی آب آشامیدنی یک‌چهارم از جمعیت جهان را شامل می‌شود (Ford and Williams, ۲۰۰۷). آبخوان-های کارستی در حدود ۱۴ درصد از سطح زمین پراکنده‌اند از مهم‌ترین منابع آب زیرزمینی به شمار می‌آیند (BGR, et al., ۲۰۱۷). 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 می-تواند 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 اپی‌کارست یا فروچاله می‌شوند که ارتباط مستقیم بین سطح و آبخوان را ایجاد می‌کنند (Ravbar and ۲۰۰۹ Goldscheider,). 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 هیدرولوژیکی 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 مجرایی کم است، درنتیجه 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 آتی 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 ٦٢٠

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

پژوهش‌های جغرافیایی در زمینه آلودگی آب زیرزمینی بر روی مکان‌های مختلف و منابع آلاینده تمرکز می‌کند (Rundquist, et al., ۱۹۹۱; Ravbar and Goldscheider, ۲۰۰۹; Dixon, ۲۰۰۵). 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 (Babiker, et al.,۲۰۰۴; Rahman, ۲۰۰۸). ازجمله کیرسو و ژو در چین (Kirso ۲۰۰۶ and Zhou,)، 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) به‌منظور بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به کار گرفته شده است. پادیلا 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.ربرسکی و همکاران ۵۰مطالعه 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 می تواند منابع آب آشامیدنی، رودخانه ها و سایر اکوسیستم های 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 به‌جز بخش کوچکی از پای دماغه پلانژدار ناودیس نعل اسبی و ارتفاعات که به لحاظ آسیب پذیری در رده‌های کم و متوسط قرار می‌گیرند در بقیه مناطق کارست نعل اسبی آسیب پذیری زیاد و خیلی زیاد می‌باشد. دسترنج و همکاران (۱۳۹۶)، به ارزیابی و تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان کارستی با استفاده از مدل COP پرداختند نتایج نشان داد که آسیب پذیری در ۵ طبقه به دست آمد به‌طوری‌که 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 سینک۲ 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 آسیب پذیری سطحی کارست در این دو آبخوان را نشان داده است. صفاری و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از ۸ فاکتور و مدل تلفیقی ترکیب خطی وزین۳ و تحلیل شبکه‌ای۴ مناطق مستعد توسعه کارستی توده کارستیک خورین در استان کرمانشاه را شناسایی کردند و سپس با استفاده از مدل پاپریکا۵ 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 داد۲۲/۷ 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
٤. ANP: Analytic Network Process
٥. Paprika

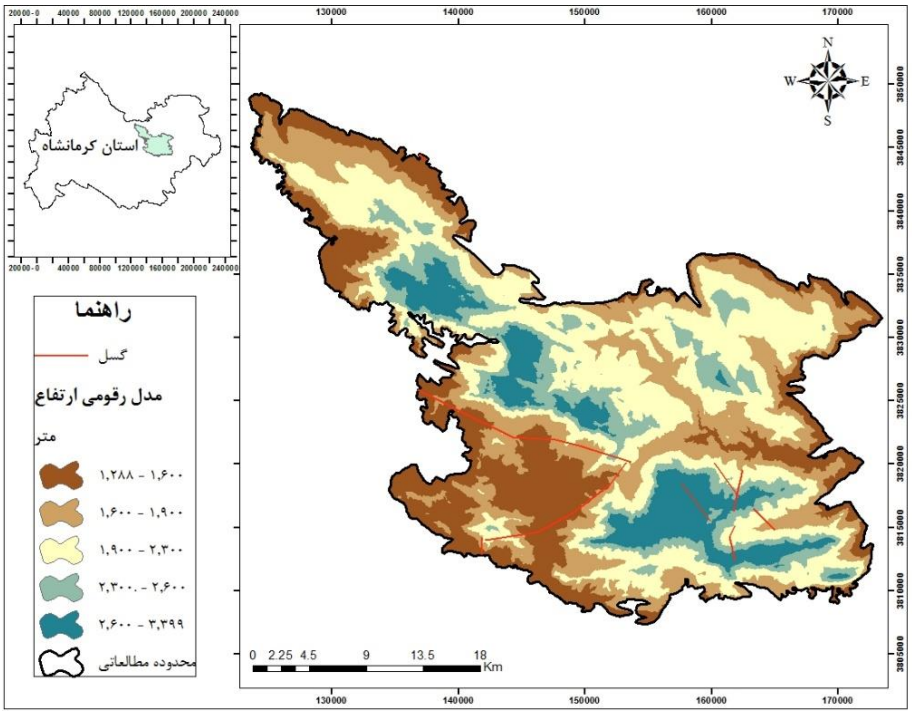
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

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.

داده ها و روش کار

- **قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه**

منطقه موردمطالعه 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 واقع‌شده 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 رادیولاریت ها. ازنظر چینه‌شناسی در منطقه مطالعاتی در سنگ‌های آهکی رخنمون‌هایی از سنگ‌های تریاس بالایی تا کرتاسه بالایی و در رادیولاریت ها 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

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

- **روش کار**

در این پژوهش از مدل‌های آسیب پذیری ذاتی پرکاربرد و معروف COP و PI در محدوده پرآو و بیستون استفاده‌شده 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 ۱:۱۰۰۰۰۰و داده‌های کیفیت آب زیرزمینی شامل نیترات و PH چشمه‌ها و چاه‌های مشاهداتی برای ارزیابی دقت مدل‌های آسیب پذیری COP و PI استفاده‌شده است. به‌طوری‌که ابتدا دو متغیر نقطه‌ای با استفاده از روش درون‌یابی[۲] به رستر پهنه‌ای تبدیل‌شده است و پس از استانداردسازی دو متغیر با هم همپوشانی و لایه نهایی کیفیت آب زیرزمینی به‌دست‌آمده است.

- **مدل COP**

مدل آسیب پذیری COP برای آبخوان‌های کارستی شامل اثرات جریان کانال و اقلیم بر آسیب پذیری طراحی‌شده است (White,۲۰۰۲). این مدل شامل سه فاکتور اصلی شامل جریانC ، لایه‌های فوقانی O و بارندگی P می‌شود. شاخص COP از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$cop = C\ score \times O\ \text{score} \times \text{P score}$$ 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:

$$C\ score = Sf \times \text{Sv}$$ رابطه(۲)

که Sv شیب و پوشش گیاهی است. Sf 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 (رابطه۳) به دست می‌آید.

$$+\text{Ol}O\ \text{score} = Os$$ رابطه(۳)

زیر فاکتور Os از ترکیب بافت خاک (سیلت، رس و ...) و ضخامت خاک و زیر فاکتور Ol 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).

$$layer\ Index = \sum(ly \times m)$$ 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).

$$Ol = layer\ Index \times cn$$ رابطه(۵)

۱. DEM: Digital elevation model

۲. IDW: Inverse distance weighting

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

- **فاکتور بارندگی Pscore**

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

$$P = PQ + PI$$ 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. به‌طوری‌که 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 (ازنظر بیولوژیکی بالاترین لایه پوسته زمین؛ ازنظر 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 خاک۱، توزیع اندازه دانه خاک زیرین۲، سنگ‌شناسی، شکاف و کارستی شدن در سنگ‌های غیر کارستی و کارستی، ضخامت همه اقشار، میانگین تغذیه مجدد سالانه و فشار آرتزین در آبخوان برآورد می‌شود؛ که امتیاز کلی P در ۵ طبقه تقسیم‌بندی می‌شود، از P=۱ محافظت خیلی کم تا P=۵ 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 داده‌شده است. با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

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

این رابطه از روش GLA اصلاح‌شده به‌دست‌آمده (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 ازجمله تفاوت بین بارندگیP و تبخیر تعرق پتانسیل۳ وابسته است.

فاکتور I نقش مهمی برای مناطق کارستی دارد؛ که شرایط نفوذ و به‌خصوص درجه‌ای که پوشش محافظ درنتیجه 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 خاک‌افقی و بسیار نفوذپذیر جایی که همه میزان تغذیه در مسیر پراکنده می‌شود برای مثال نفوذ و تراوش بعد از آن در مقابل میزان I=۰ برای شیب‌های تند با

۱. eFC: Effective field Capacity
۲. GSD: Grain Size Distribution
۳. ETp: Potential Evapotranspiration

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

نفوذپذیری کم که رواناب را به سمت پایین‌دست می‌کشاند. در چنین شرایطی پوشش محافظتی از بین خواهد رفت. سایر مناطق مقادیر میانی اختصاص داده‌شده است(۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸) که بستگی به خصوصیات خاک که فرآیندهای جریان غالب را کنترل می‌کنند، پوشش گیاهی، درصد شیب و موقعیت نقطه جریان پایین‌دست در داخل یا خارج از حوضه. دارد. فاکتور I میزان عبور از سطح محافظ توسط جریان سطحی و جانبی زیر سطح را بیان می‌کند. این‌گونه جریان در حوضه آبریزهایی که جریان به منتهی فروچاله است خطرناک تلقی می‌شود زیرا آلودگی‌ها می‌توانند مستقیماً وارد آب‌های زیرزمینی کارست شوند. مفهوم هیدرولوژیکی شامل هدایت هیدرولیکی و کمترین عمق لایه‌های 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 سانتی‌متر باشد. فاکتور I بیانگر نفوذ مستقیم نسبت به جریان سطحی و جانبی زیرسطحی است که عوامل کنترل‌کننده شامل ویژگی‌های خاک، شیب و پوشش گیاهی می‌شود. به‌طورکلی کاربری جنگل میزان قابل‌توجهی از جریان نفوذ می‌کند درحالی‌که مناطق کشاورزی به‌احتمال‌زیاد رواناب سطحی تولید می‌کنند. سرعت جریان زیرسطحی قابل اندازه‌گیری با استفاده از قانون دارسی است (به‌جز جریان استثنایی) و رابطه مستقیم با درجه شیب جریان دارد. این فاکتور بر اساس جدول ۱، ۲ و ۳ به دست می‌آید:

جدول (۱). مرحله اول تعیین خصوصیات خاک

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

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

کاربری مرتع، زمین کشاورزی			کاربری جنگل		
ویژگی خاک	شیب			شیب	
	< ۳٪/۵	۳٪/۲۷-۵	> ٪۲۷	< ۳٪/۵	۳٪/۲۷-۵	> ٪۲۷
A	۱	۱	۰/۸	۱	۱	۱
B	۱	۰/۶	۰/۴	۱	۰/۸	۰/۶
C	۱	۰/۴	۰/۲	۱	۰/۶	۰/۴
D	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۸	۰/۶	۰/۴
E	۰/۸	۰/۴	۰/۲	۱	۰/۶	۰/۴
F	۰/۶	۰/۲	۰	۰/۸	۰/۴	۰/۲

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

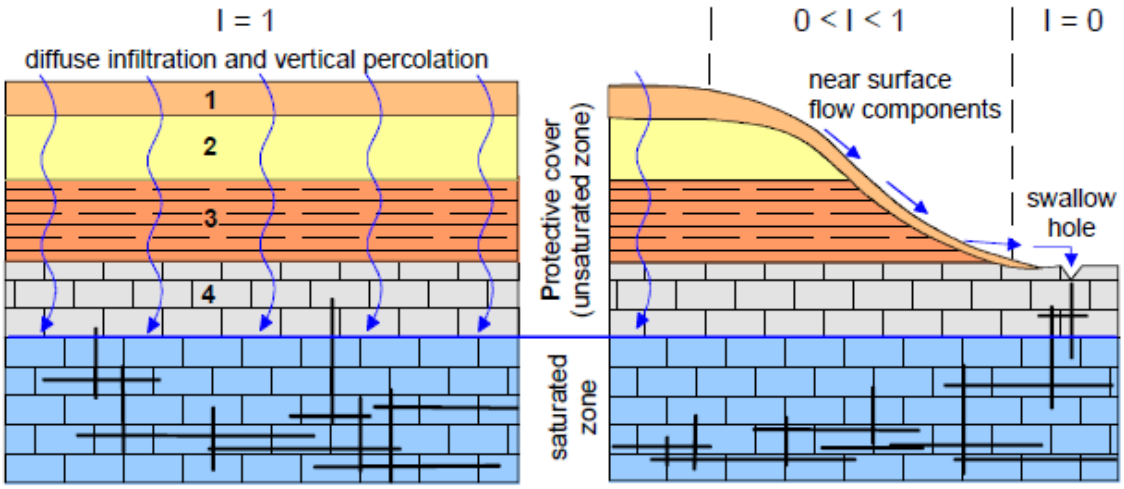
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

جدول(۳). تعین فاکتور I

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

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 به‌شدت 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 (شکل۲).



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 کارست PI حافظت نهایی از فاکتورهای P و I به دست می‌آید؛ که میزان آسیب پذیری در ۵ طبقه شناسایی‌شده 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 داده‌شده است. میزان برابر با ۵ محافظت خیلی زیاد و آسیب پذیری خیلی کم که با رنگ روشن نشان داده می‌شود (جدول ۴).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

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

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

شرح و تفسیر نتایج

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

- **نتایج مدل cop**

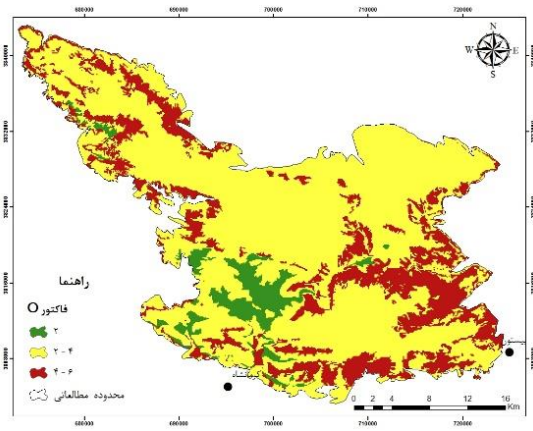
فاکتور C که نشان‌دهنده ویژگی‌های سطحی(Sf)، شیب و پوشش گیاهی (Sv) است. زیر فاکتور ویژگی‌های سطحی با توجه به اینکه محدوده مطالعه از آبخوان تراورتن تشکیل‌شده برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. همچنین با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متر مستخرج از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ نقشه شیب محدوده مطالعه در چهار طبقه ۰ تا 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 درنهایت 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 به دست آمد.

فاکتور O با استفاده از نقشه خاک و زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مطالعه به دست آمد که مجموع این دو زیر فاکتور بیانگر درجه حفاظت آبخوان با استفاده از لایه‌های 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 زمین‌شناسی محاسبه شد سپس به هر یک از سازندها بر اساس میزان تأثیری که بر آسیب پذیری آبخوان دارند ارزشی تعلق می‌گیرد به این صورت که هر چه میزان ضخامت بیشتر باشد به آن لایه ارزش کمتری در نظر گرفته می‌شود و هرچه ضخامت سازند کمتر باشد امکان آلایندگی آبخوان بیشتر است و ارزش بیشتری در نظر گرفته می‌شود چراکه امکان آلودگی آبخوان بیشتر است به همین دلیل سازند بیستون دارای بیشترین ضخامت (۳۰۰۰ متر) است ارزش ۱ و نهشته‌های آبرفتی دوره کواترنر که ضخامت کمی (۲۰۰ متر) دارند ارزش ۱۰ در نظر گرفته‌شده 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

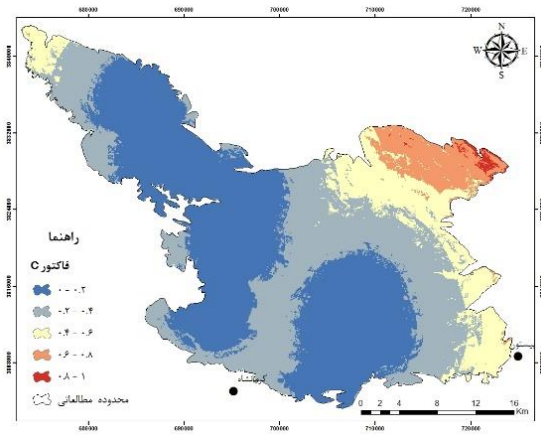
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

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

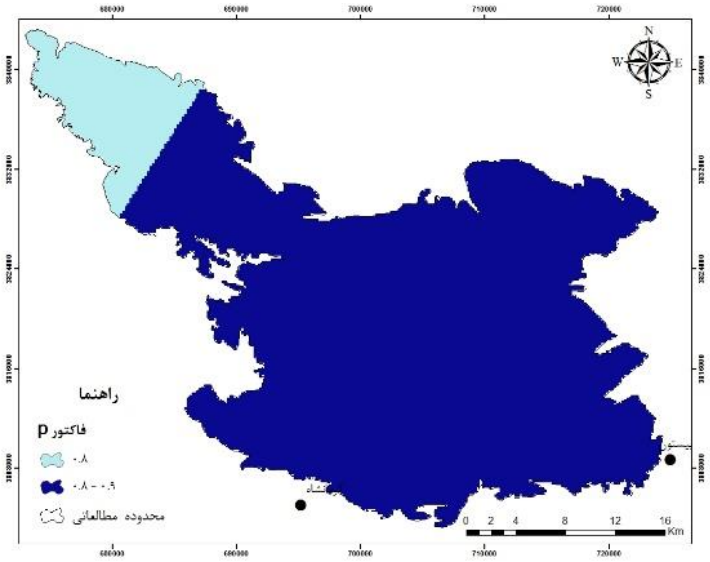
فاکتور P که توزیع زمانی بارش به همراه شدت و مدت بارش می‌تواند توانایی بارش را برای انتقال مواد آلاینده از سطح به آب زیرزمینی را نشان دهد. به همین جهت ابتدا توزیع زمانی بارش برای محدوده کمتر از ۱۰ میلی‌متر در روز که ارزش آن ۰/۵ و ۶/ در نظر گرفته شد و میزان بارندگی سالانه.۴۳۵ میلی‌متر در سال برای محدوده 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 باارزش حفاظتی کم طبقه شد (شکل ۵).



شکل(۲). نقشه پهنه‌بندی فاکتور O



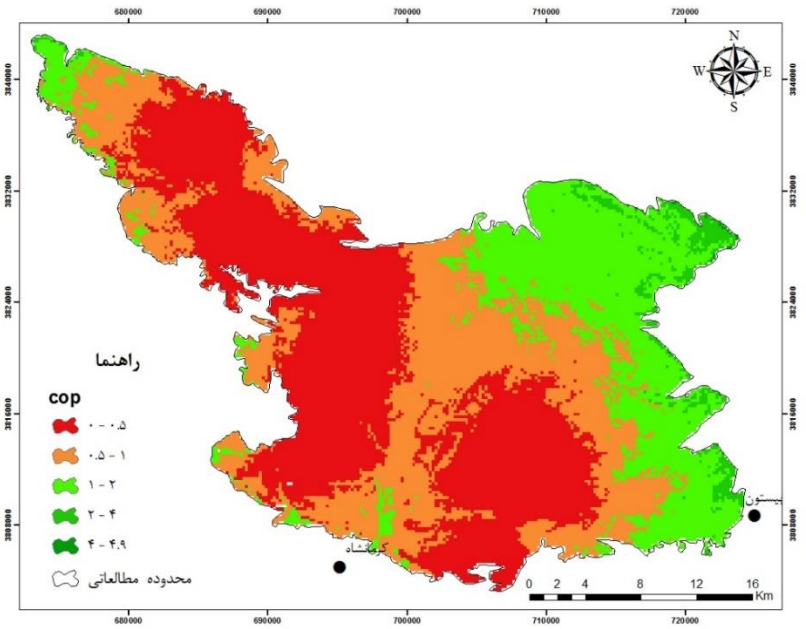
شکل(۳). نقشه پهنه‌بندی فاکتور C



شکل (۳). نقشه پهنه‌بندی فاکتور P

نقشه آسیب پذیری COP با ترکیب سه نقشه فاکتورهای C, O و P برای محدوده مطالعه در ۵ کلاس به دست آمد (شکل۶). کلاس با آسیب پذیری خیلی زیاد (۰/۵-۰) برابر ۳۸۷۷۴.۷۴ هکتار و ۴۱/۴ درصد بیشترین مساحت و کلاس با آسیب پذیری خیلی کم (۴/۹-۴) با ۵۷.۸۶ هکتار و ۰/۰۶ درصد کمترین مساحت در محدوده مطالعاتی را دارند (جدول ۵).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]



شکل (۴). نقشه آسیب پذیری آبخوان کارستی مدلCOP

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

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

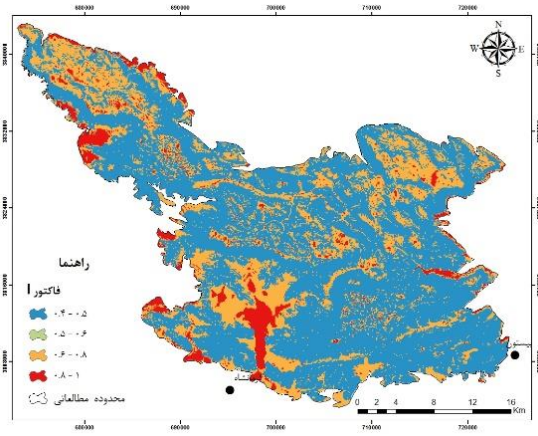
- **نتایج مدل PI**

فاکتور پوشش محافظ P از نقشه خاک، بارندگی و زمین‌شناسی استفاده‌شده 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 کم‌عمق امتیاز ۵۰ در نظر گرفته‌شده 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 به‌طوری‌که 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

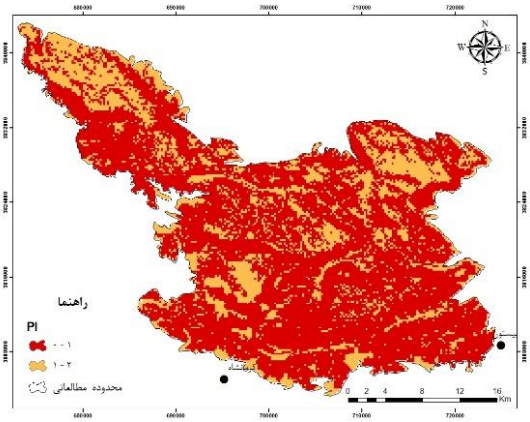
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

به‌دست‌آمده است. میزان فشار آرتزین A برابر ۱۵۰۰ در نظر گرفته‌شده 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 قرارگرفته است.

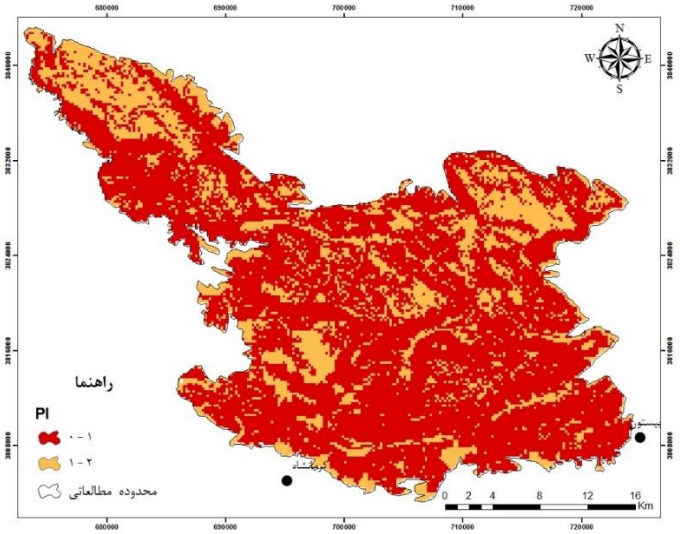
فاکتور شرایط نفوذ (I) با استفاده از خصوصیات خاک، لایه شیب و کاربری منطقه مطالعه به دست آمد (شکل ۸). بیشترین کاربری در محدوده مطالعه مرتع و ازنظر خصوصیات خاک محدوده مطالعه گروه خاک C با بیشترین مساحت ۹۰۸۷۶ هکتار وجود دارد. همچنین شیب محدوده مطالعه بین صفرتا ۴۰۷ درصد است که بیشتر محدوده شیب بالاتر از ۲۷ درصد دارد. شکل ۸ پهنه‌بندی فاکتور I را در چهار طبقه زیاد (۰/۵- ۰/۴)، 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 به‌دست‌آمده 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 پراکنده‌شده و طبقه با آسیب پذیری زیاد (۲ - ۱) با مساحت حدود ۲۵۵۲۶ هکتار و ۲۷ درصد نشان داده‌شده است (جدول۶).

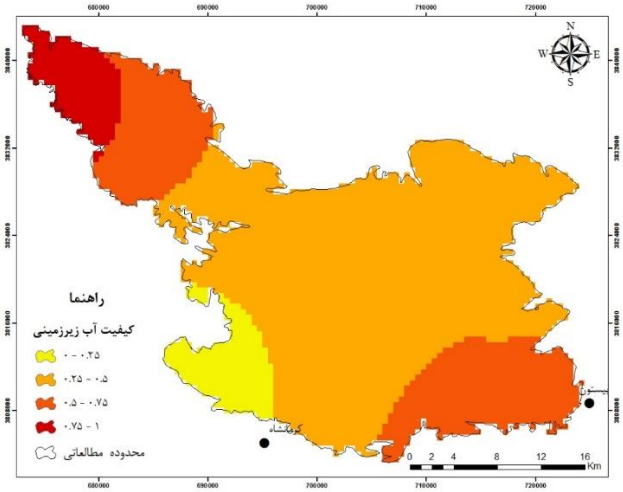
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

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 ازجمله 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 ۱۵N و ۱۸O صرف‌نظر 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 پرآو دارد. این نقشه به‌صورت ترکیب دو متغیر و استانداردشده ارائه‌شده است. همپوشانی مکانی نقشه‌های آسیب‌پذیری با نقشه آلودگی آب زیرزمینی نشان می‌دهد مدل COP بهتر توانسته آسیب‌پذیری آبخوان مدل‌سازی نماید به‌طوری‌که 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 آسیب پذیری 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 ازنظر آلودگی آسیب‌پذیر هستند. به‌طور عمده آلودگی آب‌های زیرزمینی، ناشی از فعالیت انسانی در سطح زمین است. بنابراین حفاظت از منابع آب کارستی به دلیل آسیب پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، اهمیت

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

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 DRASTIC، EPIK، GLA، COP، PI و ... می‌شوند.

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

در این پژوهش بر اساس مدل‌سازی مکانی در محیط GIS به ارزیابی آسیب پذیری آبخوان کارستی بیستون و پرآو با استفاده از مدل COP و PI پرداخته شد. درنهایت جهت ارزیابی دقت و مقایسه هر یک از مدل‌های آسیب‌پذیری COP و PI نقشه کیفیت آب زیرزمینی ازنظر نیترات و PH تهیه و با نتایج هر یک از مدل‌های آسیب پذیری 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 آسیب پذیری COP بهتر و با دقت بیشتری توانسته میزان آسیب پذیری را در آبخوان کارستی بیستون و پرآو نشان دهد.

در پژوهش حاضر آسیب پذیری آبخوان کارستی دشت کرمانشاه و بیستون و پرآو با نگاه تطبیقی با دو مدل آسیب-پذیری COP و PI انجام شد که در مقایسه پژوهش‌های انجام‌شده قبلی ازجمله ملکی و همکاران(۱۳۹۸)، نشان می‌دهد آسیب‌پذیری آبخوان کارستی بیستون و پرآو 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 پرآو را می‌طلبد. از طرف دیگر مدل‌سازی آسیب‌پذیری می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ارزشمند جهت مدیریت کیفیت منابع آب کارستی مورداستفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود پهنه‌هایی از آبخوان کارستی بیستون و پرآو که لند فرم‌هایی ازجمله 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. واکاوی تأثیرگذاری خشکسالی های شدید بر آبدهی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه (مطالعه موردی: خشکسالی شدید سال ۸۷-۸۶). *فضای جغرافیایی*، **۴۸**: ۱۹-۱.

دسترنج، علی؛ احمد نوحه‌گر، آرش ملکیان، حمید غلامی و مریم جعفری اقدم. ۱۳۹۶. ارزیابی و تهیه نقشه آسیب پذیری 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.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

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-پرآو 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*, ٤: ٦٧٣-٦٧٧.

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. ۲۰۰٤. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. *Environment International*, ۸:۱۰۰۹-۱۰۱۷. Doi: ۱۰,۱۰۱٦/S۰۱٦۰-٤۱۲۰(۰۳)۰۰۰۹۵۳.

Bakalowicz, M. ۲۰۰۵. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology*. https://Doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۰٤۰-۰۰٤-۰٤۰۲-۹.

BGR.; IAH, KIT, and UNESCO. ۲۰۱۷. World Karst Aquifer Map, ۱:٤۰ ۰۰۰ ۰۰۰. Berlin, Reading, Karlsruhe and Paris.

Christensen, Jens Hesselbjerg.; Bruce. Hewitson, and Aristita. Busuioc. 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, ۸٤۹,۹۲٦.

Daly, D.; Alain. Dassargues, David. Drew, S. Dunne, Nico. Goldscheider, S. Neale, IIeana Cristina. Popescu, and Francois. Zwahlen. ۲۰۰۲. Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology*, ۲: ۳٤۰-۳٤۵. https://Doi.org/۱۰,۱۰۰۷/ s۱۰۰٤۰-۰۰۱-۰۱۸۵-۱.

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/۱۰,۱۰۱٦/j.enggeo.۲۰۰۷,۱۱,۰۲۱

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: ۵۲٦-۵۳۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jenvman.۲۰۰۷,۰۳,۰۱۹

Dixon, B. ۲۰۰۵. Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, ٤: ۳۲۷-۳٤۷. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.apgeog.۲۰۰۵,۰۷,۰۰۲

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:۱۰,۱۰۰۲/۹۷۸۱۱۱۸٦۸٤۹۸٦

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*, ٤٦: ۱۵۷-۱٦٦.

Goldscheider. Nico. ۲۰۰۵. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology*, ٤: ۵۵۵-۵٦٤. DOI:۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۰٤۰-۰۰۳-۰۲۹۱-۳

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*, ٦۳: ۵-۲٤.

Kavouri, Konstantina.; Valerie. Plagnes, Joel. Tremoulet, Nathelie. Dörfliger, Faycal. Reijiba; and Pierre. Marchet. ۲۰۱۱. PaPRIKA: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouysse karst system (southwest France). *Hydrogeology*. ۱۹: ۳۳۹–۳۵۳. Doi.۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۰٤۰-۰۱۰-۰٦۸۸-۸

Kendall, Carol.; and Ramon. Aravena. ۲۰۰۰. *Nitrate isotopes in groundwater systems*. Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Springer, Boston, MA https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۱-٤٦۱۵-٤۵۵۷-٦_۹.

Kirso, M.; and Y.Zhou. ۲۰۰٦. GIS-based vulnerability assessment and mapping for the protection of the Dire Dawa groundwater basin. Ethiopia, ۳٤th 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: ۵٦–٦۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/S۰۰۲۲-۱٦۹٤(۹۹)۰۰۰٤٤-X

Mangin, A. ۱۹۷۵. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. University of Dijon, France (PhD Thesis).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]

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*, ۵: ٤۳۷-٤٤٦. Doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۳۲۸۰-۰۱۱-۰۱۵۲-٦.

Mudarra, M.; and B.Andreo. 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: ٦۳-۲۸۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jhydrol.۲۰۱۰,۱۲,۰۰۵

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: ٥۱۹–٥۳۳. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۳٥٦-۰۱۰-۰٤۲۲-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*, ۳۳–٤۹ https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-٥۱۰۷۰-٥_٥.

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: ۲۸٥-۲۹۷.

Rahman, A. ۲۰۰۸. A GIS based Drastic model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, ۱: ۳۲-٥۳.

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: ۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۲۲,۱٥۳۷٤۸.

Ravbar, N.; and N. Goldscheider ۲۰۰۹. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeology*, ۱۷: ۷۲٥-۷۳۳.

Reberski, Jasmina Luka.; Josip. Terzi´c; Louise. D.Maurice, and Dan. J.Lapworth. ۲۰۲۱. Emerging organic contaminants in karst groundwater: A global level assessment. *Hydrology*, ۱-۳: ۱۲۷-۲٤۲. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S۰۰۲۲۱٦۹٤۲۱۰۱۲۹۲۰

Rundquist, D. C.; A. J. Peters, L. Di, D. A. Rodekohr, R. L. Ehrman, and G. Murray. ۱۹۹۱. Statewide groundwater-vulnerability assessment in Nebraska using the drastic/GIS model. *Geocarto International*, ۲: ٥۱-٥۸.

Van Brahana, J. ۲۰۰۸. *Karst aquifers*. Encyclopedia of water science (۲nd Ed). http://www.informaworld.com/۱۰,۱۰۸۱/E-EWS۲-۱۲۰۰۱۰۰۳۹.

Van Burkalow, A. ۱۹٥۹. The Geography of New York City's water supply: a study of interactions. *Geography Review*, ۳: ۳٦۹-۳۸٦.

Vías, J.M.; B. Andreo, M.J. Perles, F.Carrasco, I. Vadillo, and P. Jiménez. ۲۰۰٦. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeol*ogy, ٦:۹۱۲-۹۲٥. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۰٤۰-۰۰٦-۰۰۲۳-٦.

White, W.B. ۲۰۰۲. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*. ٦٥: ۸٥–۱۰٥.

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*, ٦٥۸: ۱٤۷٥–۱٤۸٤

Zwahlen, F. ۲۰۰٤. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST action ٦۲۰), European Commission, Directorate-General XII Science. Res. Dev. Brussels. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/S۰۸۸٥-۲۰۱٤(۰۰)۰۰۰۳۰-۷.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1401.9.4.1.3]