نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هشتم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
صفحات ۳۷ – ۵۴

مخاطره محیطی آسیب‌پذیری ذاتی منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر ژئومورفولوژی کارست (مطالعه موردی: حوضه‌های الشتر و نورآباد)

امیر صفاری؛[1] دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران
رامین حاتمی فرد؛ دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران
منصور پروین؛ استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور

دریافت مقاله : ۱۳۹۷/۱۲/۰۶ پذیرش نهایی:۱۳۹۸/۰۹/۱۶

چکیده

در مناطق کارستی متناسب با میزان توسعه‌یافتگی ژئومورفولوژی کارست، منابع آب از آسیب‌پذیری متفاوتی در برابر آلودگی برخوردار می‌باشند. هدف پژوهش حاضر ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ذاتی منابع آب آبخوان‌های کارستی حوضه‌های الشتر و نورآباد با استفاده از روش PaPRIKa است. بنابراین در مرحله اول پهنه‌بندی توسعه و ارزیابی ژئومورفولوژی کارست با مدل فازی و عملگر گاما انجام شد. همچنین با به‌کارگیری مدل منحنی‌های بسته CCLs و تکمیل این مطالعات با پیمایش‌های میدانی، توزیع فضایی اشکال کارستی دولین مدل‌سازی شدند. در ادامه با به‌کارگیری روش PaPRIKa آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی حوضه-های الشتر و نورآباد پهنه‌بندی گردید. بررسی ژئومورفولوژی کارست نشان می‌دهد که در ارتفاعات تاقدیس گرین به علت بارش زیاد برف، دولین‌ها به عنوان فراوان‌ترین اشکال کارستی هستند که تحت عنوان کارست نیوال شناخته شده‌اند. ارزیابی آسیب‌پذیری با روش PaPRIKa، نشان می‌دهد که محدوده‌های مطالعاتی به پنج طبقه آسیب‌پذیر با درجات (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم) تقسیم شده است. به‌طوری‌که نواحی دارای خطر آسیب‌پذیری خیلی‌کم، کم و متوسط به ترتیب ۲۷/۳ ،۲۰/۶ و ۲۲/۳ درصد از مساحت محدوده تاقدیس گرین را در بر گرفته است. همچنین ۱۷و ۱۲/۸ درصد از مساحت منطقه به ترتیب دارای آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد بوده است. صحت‌سنجی ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با داده‌های EC و دبی چشمه‌ها نشان می‌دهد که چشمه‌های زز و آهنگران در محدوده با آسیب‌پذیری زیاد واقع شده‌اند. اما در چشمه‌های نیاز و عبدالحسینی در حوضه نورآباد نمودار EC در برابر دبی ماهانه تغییرات زیادی نداشته که نشان‌دهنده توسعه‌نیافتگی و یا توسعه اندک آبخوان این چشمه‌ها است.

واژه های کلیدی: تاقدیس گرین، ژئومورفولوژی، کارست، لرستان، روش PaPRIKa

[1] . نویسنده مسئول
Email: Saffari@khu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

مقدمه

کارست حاصل عملکرد فعالیت‌های انحلالی (فیزیکی و شیمیایی) در گستره سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) و همچنین سنگ‌های سولفاته و کلروره است و تحت تأثیر عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و زمین‌ساختی توسعه پیدا می‌کند (Calic, ۲۰۱۱). سنگ‌های کربناته و کارستیک حدود ۳۳ درصد از سطح زمین را تشکیل داده‌اند (Milanovic, ۲۰۰٤). سازندهای کارستی به دلیل قابلیت انحلال‌پذیری نقشی اساسی در تغذیه منابع آب‌های زیرزمینی دارند. به‌عبارتی دیگر توپوگرافی ویژه کارست در ارتباط با زهکش زیرزمینی است و ارتباط نزدیکی با ژئومورفولوژی و هیدرولوژی دارد (Waele et al, ۲۰۰۹). منابع آب کارست بخش مهمی از آب مصرفی جوامع شهری و روستایی را در بسیاری از نقاط جهان تأمین می‌کنند. به‌طوری که در حدود ۲۷ درصد جمعیت جهان از ذخایر آب کارستی استفاده می‌کنند (Milanovic,۲۰۰٤؛ Ford and Williams, ۲۰۰۷؛Afrasiabian, ۲۰۰۷؛ Raeisi, ۲۰۰۸). در واقع این لندفرم‌های محل تغذیه آبخوان‌های کارستی بوده و نفوذ آب و همچنین ویژگی‌های کمی- کیفی آب تحت تأثیر ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست و میزان توسعه کارست است. آبخوان‌های کارستی نسبت به آلودگی حساسیت زیادی دارند؛ زیرا زمان جابه‌جایی سریع منجر به ظرفیت ذخیره‌سازی اندک آب در سیستم مجرایی شده، در نتیجه جذب و فیلتراسیون کمتری در این‌گونه آبخوان‌ها صورت می‌گیرد (Mudarra & Andreo,۲۰۱۱). بنابراین حفاظت از منابع آب کارستی، به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، از مهم‌ترین اقدامات در مدیریت این‌گونه منابع به شمار می‌رود (Afrasiabian, ۲۰۰۷). نفوذ و انتشار آلاینده‌ها از سطح زمین به آب‌های زیرزمینی را می‌توان به عنوان مفهوم آسیب‌پذیری تعریف کرد (Vrba and Zoporozec, ۱۹۹٤). به‌عبارت‌دیگر آسیب‌پذیری نوعی ویژگی نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است که پتانسیل آبخوان را برای نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد (Babiker et al, ۲۰۰۵). آسیب‌پذیری از نظر مفهومی به دو دسته ذاتی و ویژه تقسیم می‌شود. در آسیب‌پذیری ذاتی ظرفیت آلودگی با توجه به وضعیت‌های طبیعی ازجمله زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی ارزیابی و آلودگی ایجاد شده بدون در نظر گرفتن آلاینده یا آلاینده‌های خاصی مشخص می‌شود. در حالی که هدف از آسیب‌پذیری ویژه، ارزیابی حساسیت آبخوان نسبت به آلاینده یا گروه خاصی از آلاینده‌ها است (Radutu et al, ۲۰۱۸). در نتیجه به‌منظور شناخت استعداد آلودگی آبخوان کارستی در نواحی مختلف، لازم است که قابلیت آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گیرد (Aller et al. ۱۹۸۷; Bekesi and McConchie, ۲۰۰۰). تهیه نقشه آسیب‌پذیری یک رویکرد علمی برای حفظ منابع آب زیرزمینی است که برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ مطرح شد (Adams and Foster,۱۹۹۲). این رویکرد بطور قابل توجهی در طول دهه‌های گذشته به علت پیشرفت در مدل‌های هیدرولوژیکی وGIS مورد توجه قرار گرفته است (Kattaa et al.,۲۰۱۰). روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی ارائه شده است. این مدل‌ها و روش‌ها در تدوین وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان‌ها؛ شرایط ژئومورفولوژی کارست، زمین‌شناسی، توپوگرافی، اقلیم، پوشش گیاهی، خاک، کاربری اراضی و اثرات فعالیت‌های انسانی را مد نظر قرار می‌دهند. ازجمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

DRASTIC (Aller et al. ۱۹۸۷); GOD (Foster, ۱۹۸۷); SINTACS (Civita, ۱۹۹٤); EPIK (Doerfliger and Zwahlen, ۱۹۹۸); PI (Goldscheider et al. ۲۰۰۰); RISK (Petelet et al. ۲۰۰۰); SI (Stigter,۲۰۰٦); COP (Vias et al. ۲۰۰٦); PaPRIKa (Kavouri et al. ۲۰۱۱).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

پژوهش‌های متعدد در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با روش‌های مختلف انجام گرفته است. ازجمله: (Awawdeh, et al. ۲۰۰۹) در پژوهشی با استفاده از مدل EPIK به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ارید[۱] در شمال اردن پرداختند. نقشه پهنه‌بندی آلودگی نشان می‌دهد که ۳۴ درصد منطقه دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد نسبت به آلودگی است. (V۱´as et al. ۲۰۰۹) مدلCOP را به‌منظور بررسی میزان آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌های کارستی ابداع نموده و منطقه کوهستانی سیرا[۲] در اسپانیا را با این روش مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داده است که روش COP نسبت به سایر روش‌ها در بررسی آسیب‌پذیری انعطاف بیشتری دارد. (Kavouri, ۲۰۱۱) به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی منابع آب کارستی بر پایه روش‌های RISKE و EPIK روشی با عنوان PaPRIKa ارائه دادند. محققان مذکور این روش را در ۹ منطقه جنوب فرانسه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داده است که این روش نسبت به روش‌های پیشین می‌تواند ارزیابی بهتری از آسیب‌پذیری منابع آب کارستی ارائه می‌نماید. (Beynen et al. ۲۰۱۲) به مطالعه مقایسه‌ای آسیب‌پذیری آبخوان کارستی در مرکز فلوریدا با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی در منطقه کی‌وی[۳] پرداختند. تحلیل حساسیت آبخوان‌ها نشان داده است که چاله‌های بسته و نیز هدایت هیدرولیکی آبخوان اهمیت زیادی در آلودگی آبخوان دارد. (Marin et al. ۲۰۱۲) دو روش COP و PaPRIKa را در اسپانیا و فرانسه مورد مقایسه قرار داده‌اند. نتایج نشان‌دهنده مناسب بودن این دو روش در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی است. (Bagherzadeh et al. ۲۰۱۸) آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی حوضه رودخانه کارون را نسبت به آلودگی با استفاده از روشCOP مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج گویای اینست که مناطق شرقی کمترین میزان آسیب‌پذیری و مناطق شمال‌غرب بالاترین میزان آسیب-پذیری را دارا می‌باشند. به عبارتی بیش از ۶ درصد منطقه مور مطالعه دارای بیشترین خطر آسیب‌پذیری است. دسترنج و همکاران (۱۳۹۶) در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دالاهو به روشCOP نتیجه گرفته‌اند که بیش از ۶۹ درصد آبخوان دالاهو مستعد آسیب‌پذیری با درجه زیاد است. فرزین و منبری (۱۳۹۷) آسیب‌پذیری آبخوان کارستی تنگه کناره یاسوج را با روش COP ارزیابی نموده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داده است که بیشترین مساحت آسیب‌پذیر در منطقه مورد مطالعه بر سازند آهک آسماری منطبق است. همچنین پارامترهای مقدار بارش، تمرکز جریان و لایه‌های پوششی به ترتیب مهم‌ترین عوامل موثر در آسیب‌پذیری آبخوان مذکور می‌باشند. بعلاوه افراد دیگری نیز در این زمینه تحقیقات متعددی با روش‌ها و مدل‌های دیگر نیز انجام داده‌اند. ازجمله: Huneau et al. ۲۰۱۳; Abdullah et al. ۲۰۱۶، سیف و همکاران (۱۳۹۳)، سلطانی و همکاران (۱۳۹۳)، زنگنه اسدی و همکاران (۱۳۹۴)، رنگزن و همکاران (۱۳۹۶).

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ذاتی منابع آب آبخوان‌های کارستی در حوضه‌های الشتر و نورآباد در محدوده تاقدیس گرین (استان لرستان) با استفاده از روش PaPRIKa است.

[۱] Arid
[۲] Sierra
[۳] Kavi

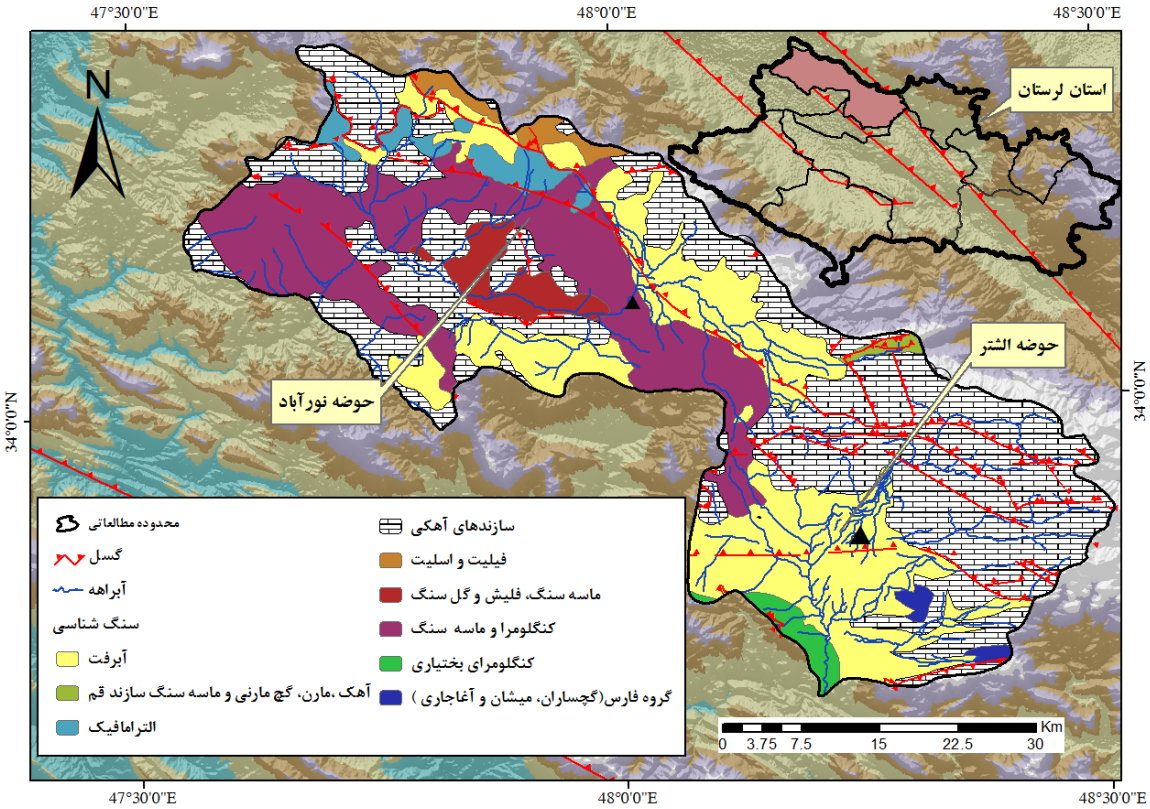
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

داده ها و روش کار

- **منطقه مورد مطالعه**

قسمت عمده تاقدیس گرین به لحاظ تقسیم‌بندی واحدهای مهم زمین‌شناختی و ساختمانی ایران، در زون زاگرس مرتفع قرارگرفته است و در بخش غربی و جنوبی به زون زاگرس چین‌خورده منتهی می‌شود. بالاترین و پایین‌ترین ارتفاع در این محدوده به ترتیب ۳۶۴۳ و ۱۴۸۹ متر از سطح دریا می‌باشد. بیشتر مناطق و ارتفاعات محدوده در شرق و شمال الشتر را سازندهای آهکی کرتاسه در برگرفته‌اند. این تشکیلات بر اثر فشارهای تکتونیکی بشدت دچار چین‌خوردگی و فرآیند گسلش شده و درز و شکاف‌های متعددی در آن‌ها به وجود آمده به همین لحاظ در تغذیه سفره آبرفتی دشت الشتر نقش بسیار مهمی را ایفا می‌نمایند. تاقدیس گرین درحوضه نورآباد عمدتاً از آهک‌های خاکستری با میان لایه‌های مارنی، آهک‌های با تبلور مجدد و سنگ‌های آذرآواری تشکیل شده که از طرف شمال و شمال‌غرب به سنگ‌های دگرگونی از قبیل مرمر، اسلیت، توف و لاواهایی که همگی تحت تأثیر فاز شدید دگرگونی قرار گرفته‌اند؛ محدود می‌شود (شکل‌های ۱ و۲).



شکل ۱. زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

شکل۲. آهک خردشده در محدوده تاقدیس گرین

- **روش کار**

از آنجایی که هدف این مطالعه پهنه‌بندی و ارزیابی حفاظتی نواحی آسیب‌پذیر نسبت به آلودگی است، بنابراین علاوه بر مطالعات کتابخانه‌ای، از مدل‌های و روش‌های مناسب به‌منظور پهنه‌بندی کارست و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها نیز استفاده گردیده است. بدین صورت که ابتدا توزیع فضایی دولین‌ها (به عنوان مهم‌ترین اشکال کارستی که نقش عمده‌ای در تغذیه و آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی دارند) مشخص گردید. در مرحله بعد وضعیت توسعه کارست در منطقه مورد مطالعه با روش فازی انجام گردید. همچنین از روش PaPRIKa به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی استفاده شده است. بعلاوه چندین مرحله پیمایش میدانی گسترده به‌منظور شناخت ژئومورفولوژی کارست حوضه‌های مورد مطالعه و ارزیابی تکمیلی و نیز راستی آزمایی مدل‌های مورد استفاده، انجام گرفته است.

- **مدل‌سازی دولین‌های کارستی**

با توجه به نقش دولین‌ها در ویژگی‌های کمی و کیفی منابع آب کارستی و امکان ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها، شناسایی و مدل‌سازی این اشکال از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین با استفاده از پیمایش‌های میدانی، تفسیر بصری، تحلیل مدل رقومی ارتفاع (DEM) و به به‌کارگیری مدل منحنی‌های بسته CCLs[1]، توزیع فضایی این اشکال کارستی در محدوده مورد مطالعه مشخص گردیدند. بنابراین ابتدا با شناسایی سازندهای مستعد توسعه کارست در منطقه و انطباق نقشه زمین‌شناسی با DEM به‌طور نسبی وجود چاله‌های بسته در مناطق مورد مطالعه مشخص گردید. در مرحله بعد با استفاده از روش پیکسل‌بندی (۰ و ۱)، موقعیت چاله‌های بسته کارستی بر روی DEM مشخص گردید. در مرحله سوم مدل سایه روشن با آزیموت ۳۵۲ و زاویه تابش ۴۵ درجه با استفاده از DEM با قدرت تفکیک ۱۰ متر تهیه شد. در مرحله چهارم

[1] Closed Contour Lines

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

چاله‌های بسته و دولین‌ها با به‌کارگیری روش خطوط منحنی بسته به صورت اتوماتیک استخراج گردید (Liang and Du, ۲۰۱۴). در این روش جهت استخراج دولین‌ها، ابتدا خطوط منحنی میزان بسته (دارای کمترین ارتفاع) که حداقل یک منحنی میزان دیگر را شامل می‌شود به عنوان دولین در نظر گرفته شد. در مرحله نهایی و طی پیمایش‌های میدانی موقعیت دقیق دولین‌های مشخص شده در مرحله قبل با استفاده از دستگاه GPS ثبت و راستی آزمایی گردید. مدلسازی دولین‌ها و چاله‌های بسته در محیط در نرم‌افزار Arc GIS ۱۰,٤ با به‌کارگیری مدل منحنی‌های بسته CCL_S انجام گرفته است.

- **پهنه‌بندی توسعه کارست**

با توجه به اینکه ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌های کمی-کیفی منابع آب و ارزیابی آسیب‌پذیری این منابع تأثیر زیادی دارد، بنابراین پهنه‌بندی توسعه کارست ضروری است. ازجمله روش‌های مناسب جهت پهنه‌بندی توسعه کارست، روش فازی است با توجه به اینکه تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارست، قطعی و صددرصدی نیست. برای مطالعه چنین شرایط پیچیده و مبهمی، مدل فازی مناسب می‌باشد، زیرا با استفاده از نظریه فازی، می‌توان متغیرهای نادقیق و مبهم را به شکل ریاضی درآورد. به‌عبارت دیگر در منطق فازی، میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقدار یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) و تغییرات از ۰/۱ تا ۰/۹ تعریف می‌شوند (مؤمنی،۱۳۹۶: ۱۸۷). در تئوری مجموعه‌های دقیق، هر عضو مجموعه مرجع یا در مجموعه هست و یا نیست و می‌توان برای هر مجموعه A تابع زیر را تعریف کرد (رابطه۱) (مؤمنی، ۱۳۹۶: ۱۹۷).

$$\mu A = \begin{cases} 1, If\ \ X \in A \\ 0, If\ \ X \notin A \end{cases}$$ رابطه (۱)

این تابع به هر عضو مجموعه A عدد یک و به هر عضو خارج از مجموعه A عدد صفر نسبت می‌دهد. جهت پهنه‌بندی توسعه کارست در حوضه‌های الشتر و نورآباد عوامل زمین‌شناسی (لیتولوژی)، اقلیمی (بارش و دما)، توپوگرافی (ارتفاع)، شیب، فاصله از گسل، جهت شیب، کاربری اراضی و خاک‌شناسی به عنوان پارامترهای موثر انتخاب شدند. بنابراین ابتدا تک‌تک لایه‌ها با توجه به هدف موردنظر بر اساس توابع عضویت، فازی سازی شده و ارزشی بین ۱و۰ به هر لایه اختصاص داده شد. پارامترهای فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، بارش و دما، با توجه به ماهیت رستری آن‌ها با استفاده از توابع موجود در نسخه نرم‌افزار ArcGIS۱۰,٤ و یا کد نویسی در تحلیلگر Raster Calculator فازی سازی گردیدند. تابع عضویت لایه‌های وکتور بر اساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی دارد، تعیین گردیده است. روش فازی با پنج عملگر OR (اجتماع)، AND(اشتراک)، Product (ضرب جبری)، SUM (جمع جبری) و Gama (گاما) در محیط نرم‌افزار ArcGIS۱۰,۲ قابل‌اجرا است. در این پژوهش به دلیل نقش تعدیلی عملگر گاما از آن استفاده شده است. این عملگر برحسب ضرب جبری فازی و جمع جبری فازی بر اساس رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\mu_{Combination} = ((\text{Fuzzy Algebraic Sum})\ (\text{Fuzzy Algebraic Product}))^{1-\gamma}$$ رابطه (۲)

در این رابطه $\mu_{Combination}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده صفر و یک است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

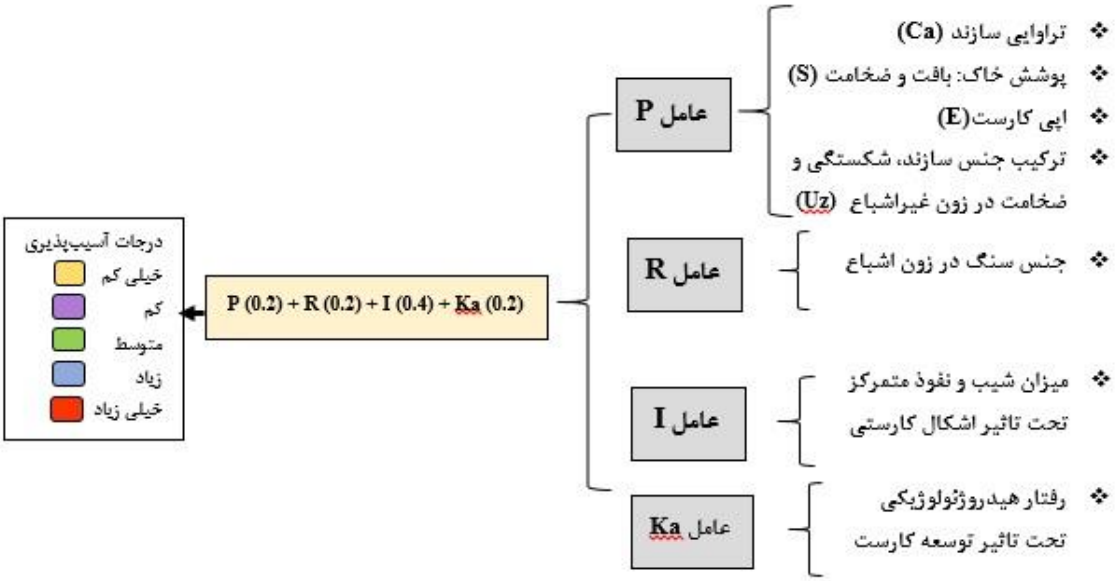
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

- **ارزیابی آسیب‌پذیری به روش PaPRIKa**

روش PaPRIKa بر اساس چهار عامل: P[۱] (لایه‌های بالایی محافظ آب‌های زیرزمینی)، R[۲] (نوع سنگ در زون اشباع) I[۳] (نفوذ سطحی) و Ka[۴] (ژئومورفولوژی کارست)، آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی را ارزیابی می‌کند. اساس این مدل با استفاده از روش‌های EPIK (Dorfliger and Zwahlen, ۱۹۹۸) و RISKE (Petelet et al. ۲۰۰۰; Plagnes, et al. ۲۰۰۵) بنانهاده شده و توسط کاووری[۵] و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شده است. در واقع این روش با توجه به خصوصیات لایه‌های محافظ کارست بیرونی و اپی‌کارست، میزان شیب زمین و تأثیر آن در نفوذ آبراهه‌ها و همچنین با در نظر گرفتن نقش عوارض و اشکال سطحی کارست (ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست)، آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی را ارزیابی می‌کند.

در نهایت درجات آسیب‌پذیری سامانه‌های کارستی با استفاده از رابطه (۳) مورد سنجش قرار می‌گیرد (Kavouri et al. ۲۰۱۱) (شکل۳). همه مراحل ارزش‌گذاری و تهیه نقشه عوامل چهارگانه روش PaPRIKa در نرم‌افزار Arc GIS۱۰.٤ انجام گرفته است.

رابطه (۳) $P\times۰,۲ + R\times۰,۲ + I\times۰,٤ + Ka\times۰,۲$



شکل۳. مراحل اجرایی ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی به روش PaPRIKa (اقتباس از **Kavouri et al. ۲۰۱۱**)

[۱] .Protection

[۲] .Reservoir

[۳] Infiltration

[۴] .Karstification

[۵] .Kavouri

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

شرح و تفسیر نتایج

- **ژئومورفولوژی کارست محدوده تاقدیس گرین**

در محدوده تاقدیس گرین چشم‌اندازهای کارستی حاصل دخالت مشترک فرایندهای مورفودینامیک درونی و بیرونی، عوامل اقلیمی و سنگ‌شناسی در طی زمان است. تکتونیک منطقه گرین در ارتباط با تکوین زاگرس و کمربند کوهزایی آن است. وجود گسل‌های گاماسیاب، گرین- گاماسیاب و گرین- کهمان، منطقه گرین را به شدت تکتونیزه نموده است. به‌طوری‌که حرکات تکتونیکی باعث ایجاد درزه‌ها و شکستگی‌های متعدد و فراوان در رخنمون سنگ‌های انحلال‌پذیر آهکی، مارنی- آهکی و دولومیتی ضخیم لایه مربوط به دوران کرتاسه شده است. با توجه به فراهم بودن شرایط مناسب کارست‌زائی، ازجمله سنگ‌شناسی، تکتونیک فعال، اقلیم مدیترانه‌ای (با میانگین بارش بین ۴۵۴ - ۴۸۴ میلی‌متر و متوسط دمایی ۱۳ درجه سانتی‌گراد) و شرایط ژئومورفولوژیکی مناسب، اشکال کارستی متنوعی ازجمله چاله‌های بسته (دولین، پونور (حفرات بلعنده)[۱]، آون و پولیه (پلژه))، کارن‌ها، دره‌های کارستی، حفرات انحلالی، غارهای کوچک و بزرگ و چشمه‌ها در محدوده تاقدیس گرین شکل گرفته است. در ارتفاعات گرین بارش نسبتاً سنگین برف و ذوب فصلی آن، خردشدگی و ایجاد رسوبات ناشی از یخ‌زدگی سنگ‌ها، توسعه کارن را محدود نموده است. مهم‌ترین و فراوان‌ترین سیمای کارستی در ارتفاعات گرین چاله‌های بسته به‌ویژه دولین‌ها (ریزشی، انحلالی، ریزشی- پوششی و فرونشتی) است؛ که تحت عنوان کلی کارست نیوال[۲] شناخته شده‌اند (شکل۴ و ۵).

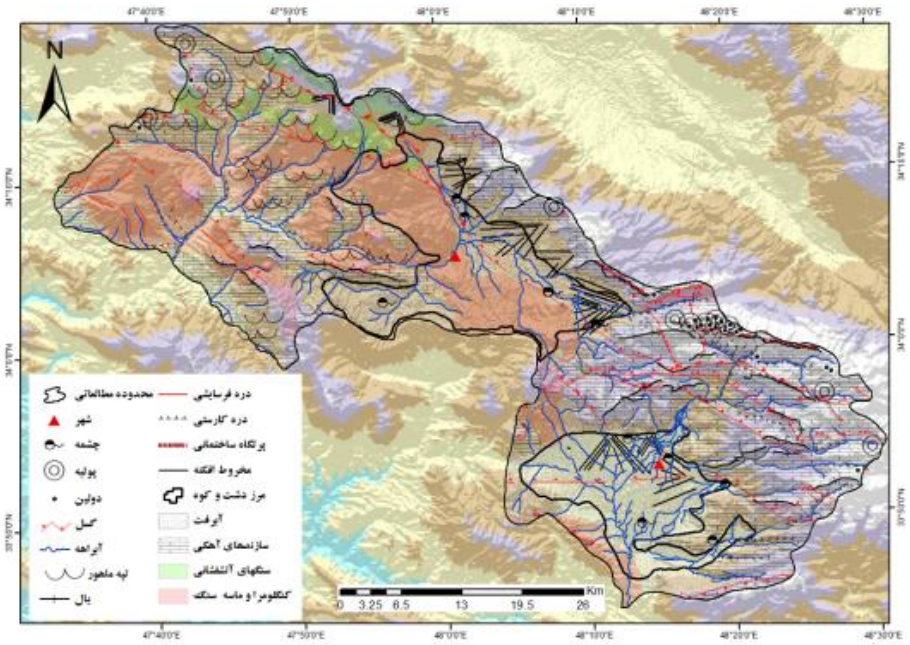
شکل۴. نمونه‌ای از کارست نیوال در ارتفاعات گرین (مقیاس: سایه عکاس)

[۱] Ponor or Swallow Hole

[۲] Nival Karst

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]



شکل۵. نقشه ژئومورفولوژی کارست محدوده تاقدیس گرین (مأخذ: نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و پیمایش میدانی)

- **پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی با مدل فازی**

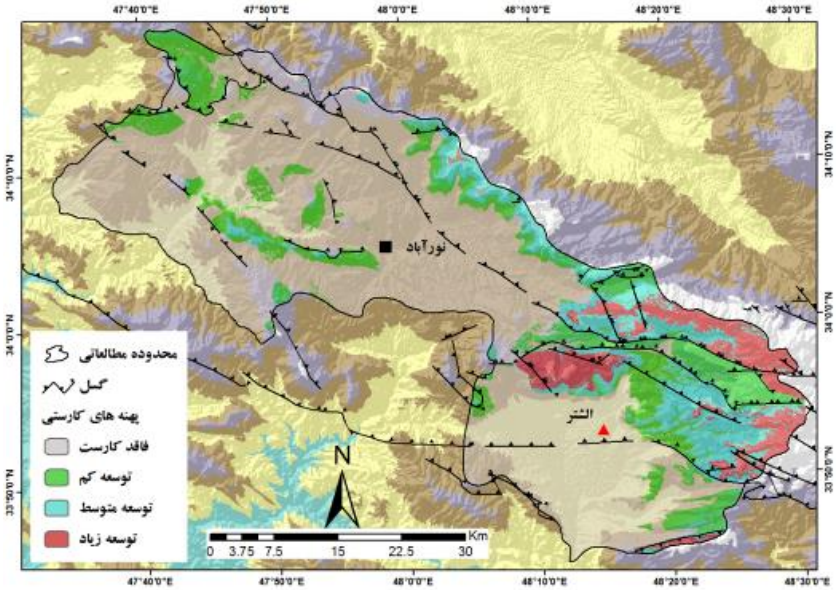
نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی نشان می‌دهد که محدوده حوضه‌های الشتر و نورآباد به لحاظ توسعه کارست به چهار پهنه شامل نواحی فاقد کارست (۱۲۲۷ کیلومترمربع، ۵۶/۶ درصد)، نواحی با توسعه کم (۳۵۱ کیلومترمربع معادل ۱۶/۲ درصد)، نواحی با توسعه متوسط (۲۶۵ کیلومترمربع، ۱۲/۲ درصد) و در نهایت پهنه‌های با توسعه زیاد (معادل ۳۲۵ کیلومترمربع، ۱۵ درصد) تقسیم شده است (شکل ۶ و جدول ۱).

جدول ۱. مساحت پهنه‌های کارستی با مدل فازی در تاقدیس گرین

پهنه کارستی	مساحت (km^2)	مساحت(٪)
فاقد کارست	۱۲۲۷	۵۶/۶
کارست با توسعه کم	۳۵۱	۱۶/۲
کارست با توسعه متوسط	۲۶۵	۱۲/۲
کارست توسعه‌یافته	۳۲۵	۱۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]



شکل ۶. پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی با استفاده از مدل فازی

- **ارزیابی آسیب‌پذیری محدوده تاقدیس گرین به روش PaPRIKa**

در این روش عامل P ترکیبی از چهار زیر عامل Ca (تراوایی سازند) ، S (پوشش خاک: شامل بافت و توزیع اندازه دانه‌ها و ضخامت خاک)، E (زون اپی‌کارست) و Uz (ترکیبی از جنس سازند، ضخامت و شکستگی در زون غیراشباع) است. برای تهیه نقشه عاملP ابتدا با استفاده از نقشه واحدهای ارضی، بافت و ضخامت خاک مشخص شده و به معیارهای کمی تبدیل گردید. سپس با استناد به نقشه‌های زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰: ۱ جنس سازندها مشخص و نسبت به کمی نمودن آن‌ها در نرم در نرم‌افزار Arc GIS ۱۰,٤ اقدام گردید. در این عامل زمین‌شناسی منطقه اهمیت زیادی دارد. عمده‌ترین سازندهای موجود در محدوده شامل آهک‌های سازند سروک و آهک‌های مارنی (کرتاسه بالائی)، سازندهای آهکی تله زنگ (دوره ائوسن) و همچنین آبرفت‌های کواترنری است. زیرعامل‌های عامل P با توجه به جداول (۲ تا ۴) ارزش‌گذاری و پهنه‌بندی شده است (شکل۷).

جدول ۲. خصوصیات زیرعامل‌های Ca و S از عامل P (به ترتیب از راست)(Kavouri et al. ۲۰۱۱)

طبقه	خصوصیات نفوذپذیری
Ca_1	سازندهای با نفوذپذیری بالا: شن و ماسه و آبرفت
Ca_2	سازندهای با نفوذپذیری متوسط: آهک‌های کارستی
Ca_3	سازندهای با نفوذپذیری کم: ماسه سنگ، کنگلومراها، سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی
Ca_4	سازندهای با نفوذپذیری خیلی کم: رس و مارن

درصد گراول	بافت خاک		
	رس	سیلت و لوم	ماسه
۰ - ۱۵	۱	۱	۲
۱۵-۶۰	۱	۲	۳
بیشتر از ۶۰	۲	۳	۳

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

جدول ۳. خصوصیات زیرعامل‌های S و E از عامل P (از راست) (Kavouri et al. ۲۰۱۱)

شاخص خاک زیر فاکتورS		طبیعت خاک			
سازندهای غیرقابل نفوذ		۰	۰	۰	۰
ضخامت خاک	بیشتر از ۵ متر	۱	۱	۱	۲
	۵-۱ متر	۱	۱	۲	۳
	۹۹-۶۰cm	۲	۲	۳	۴
	۵۹-۳۰cm	۳	۳	۴	۴
	۲۹-۰cm	۴	۴	۴	۴

شاخص	خصوصیات
E_1	آبخوان معلق با سطح پیزومتری بالا
E_2	آبخوان آپی کارست، گسترش جانبی محدود با چشمه‌های موقتی با نرخ جریان ۱ لیتر بر ثانیه و بیشتر
E_3	آبخوان آپی کارست، گسترش جانبی محدود با چشمه‌های با نرخ جریان کم
E_4	فاقد اپی کارست

جدول ۴. خصوصیات زیرعامل UZ از عامل P (Kavouri et al. ۲۰۱۱)

شاخص	خصوصیات
LUZ_0	لایه‌های ضخیم رسی
LUZ_1	رس، مارن و آهک مارنی(۲۵ تا ۳۰٪ کانی‌های رسی)
LUZ_2	آهک مارنی(۱۰ تا ۲۵٪ کانی‌های رسی)
LUZ_4	سنگ آهک توده‌ای و دولومیت

در عامل R جنس سنگ‌ها و میزان شکستگی در سازندها مورد توجه است که پتانسیل کارست‌زایی در سنگ‌های حاوی مخازن آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. تأثیر نوع سنگ بر آسیب‌پذیری ذاتی به‌واسطه ویژگی‌های سنگ‌شناسی و ساختاری پهنه‌های کربناته (گسل‌ها و درجه شکستگی) مشخص می‌شود. برای محاسبه و ارزیابی این عامل با استفاده از نقشه زمین-شناسی، تمامی سازندهای موجود ارزش‌گذاری گردیدند. همچنین گسل‌ها از طریق تصاویر ماهواره‌ای ETM^+ و شکستگی‌ها و درز و شکاف‌ها به‌واسطه پیمایش‌های میدانی مشخص‌شده است (جدول۵ و شکل ۶).

جدول۵. خصوصیات عامل R (Kavouri et al. ۲۰۱۱)

امتیاز	خصوصیات
۱	تأثیر کم بر روی آسیب‌پذیری: سنگ آهک مارنی (۲۵تا ۳۵ ٪ کانی‌های رسی و سازندهای گچی با شکستگی کم
۲	تأثیر متوسط بر روی آسیب‌پذیری: سنگ آهک مارنی (۱۰ تا ۲۵ ٪ کانی‌های رسی) و سازندهای گچی با شکستگی بالا، سنگ آهک و دولومیت تحت تأثیر شکستگی‌های همگن
۳	تأثیر زیاد بر روی آسیب‌پذیری: دولومیت یا سنگ‌آهک‌های توده‌ای کارستی و دارای شکستگی، لایه‌های ضخیم سنگ‌آهک و دولومیت با شیب بیشتر از ۴۵ درجه و افزایش جریان به سمت چشمه
۴	تأثیر بسیار بالا بر روی آسیب‌پذیری: شبکه‌های کارستی توسعه‌یافته (حفره‌های زهکشی و غارها)، زون‌های گسلی که نقش هدایت جریان آب زیرزمینی را دارند.

عاملI نقش پارامترهای میزان شیب و نفوذ متمرکز به‌واسطه اشکال کارستی موجود در ارتفاعات تاقدیس گرین ازجمله: دولین‌ها، پهنه‌های کارنی، گرایک‌ها، شکستگی‌ها و حفرات بلعنده و جریان فرورو[1] که تأثیر عمده‌ای در نفوذپذیری و آسیب-پذیری ذاتی نواحی کارستی محدوده مورد مطالعه دارند، را ارزیابی می‌کند. اشکال کارستی محدوده مورد مطالعه به‌واسطه پیمایش‌های میدانی شناسایی و موقعیت آن‌ها با دستگاه GPS برای پهنه‌بندی توسعه کارست و ارزیابی نقش آن‌ها در

[1]-Stream-Sink

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی حوضه‌های الشتر و نورآباد، ثبت گردید. برای ارزش‌گذاری این عامل از لایه شیب منطقه و همچنین نقشه پراکندگی عوارض کارستی استفاده شده است (جدول۶ و شکل۷).

جدول ۶. خصوصیات عامل I (Kavouri et al. ۲۰۱۱)

فاکتور I	خصوصیات
I_0	شیب بیشتر از ۵۰ ٪ با نفوذ سطحی کم و تغذیه اصلی از رواناب
I_1	شیب ۵۰-۱۵ ٪ تحت تأثیر رواناب
I_2	شیب ۱۵-۵ ٪، رواناب محدود به نواحی کربناته است(دره‌های خشک و پهنه‌های کارنی)
I_3	شیب ۵-۰ ٪ نفوذ سطحی به‌واسطه رواناب‌ها، دولین‌ها، پولیه‌ها و کارن‌ها، توسعه عمودی شیارها و مجراها
I_4	حفره‌های کم عمق و فروچاله‌ها با نفوذ سطحی متمرکز

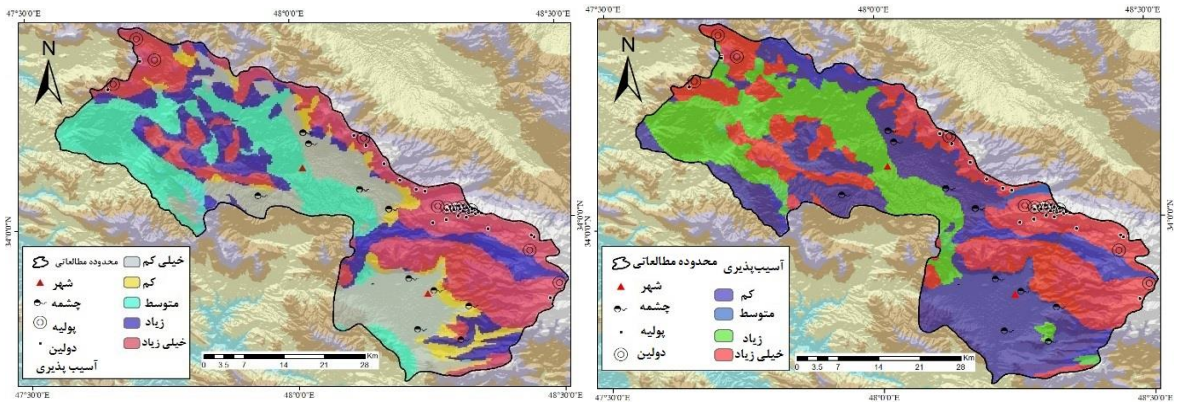
عامل Ka نشان‌دهنده رفتار هیدروژئولوژیکی محیط‌های کارستی تحت تأثیر توسعه کارست و ظرفیت زهکشی شبکه‌های کارستی است. به‌عبارت‌دیگر عامل Ka تعیین کننده ظرفیت زهکشی و شبکه مجاری کارستی است که بر پایه آنالیزهای هیدروگراف و یا آزمون ردیاب‌های مصنوعی تعیین می‌گردد. کارست پدیده فرسایشی است که سازوکار آن انحلال و خورندگی توده سنگ‌های کربناته به‌واسطه اسید کربنیک محلول در آب است. در آب‌وهوای سرد به علت افزایش ظرفیت انحلالی اسید کربنیک و کاهش Ph آب، خورندگی و انحلال آب و در نتیجه توسعه کارست افزایش می‌یابد. بنابراین هر چه کارست توسعه‌یافته‌تر بوده و اشکال کارستی نظیر دولین‌ها، گرایک‌ها، پونورها و ... بیشتر وجود داشته باشد، با توجه به نقش این اشکال در نفوذ آب به منابع زیرزمینی، پتانسیل آلودگی منابع آب نیز افزایش می‌یابد. در این پژوهش از تجزیه‌وتحلیل منحنی آبنمود چشمه‌های منتخب در یک دوره زمانی ۱۵ ساله (۹۴-۱۳۸۰) و همچنین نتایج پهنه‌بندی توسعه کارست (شکل۵) برای تعیین عامل Ka استفاده شده است (جدول۷ و شکل۸).

جدول ۷. خصوصیات عامل Ka (Kavouri et al. ۲۰۱۱)

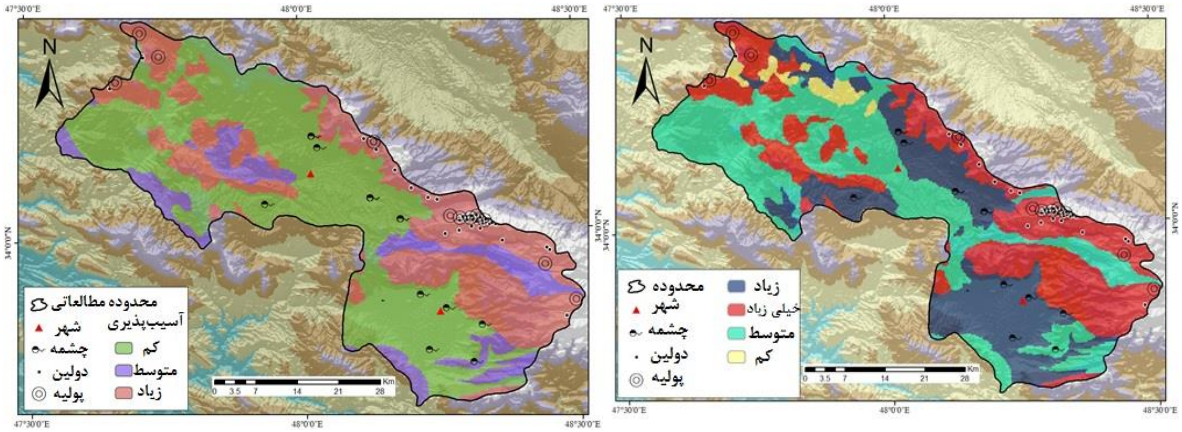
کارست‌زایی	خصوصیات
Ka_1	حوضه‌های با مساحت کمتر از ۱۰ کیلومترمربع با میانگین دبی سالانه پایین و در آن سیستم کارستی دارای نوسان کم بوده و شواهد جریان سریع آب زیرزمینی وجود ندارد
Ka_2	حوضه‌های با مساحت بیشتر از ۱۰ کیلومترمربع بدون تلفات آب، رفتار عملکردی پایین
Ka_3	حوضه‌های با مساحت بیشتر از ۱۰ کیلومترمربع که در آن سیستم کارستی دارای عملکرد بالایی است، شبکه زهکشی زیرزمینی به‌خوبی توسعه‌یافته که با سطح زمین ارتباط نسبی دارد.
Ka_4	حوضه‌های با مساحت کمتر یا بیشتر از ۱۰ کیلومترمربع، شبکه‌های زهکشی زیرزمینی به‌خوبی توسعه‌یافته و دارای مجراهای بزرگی که با سطح زمین ارتباط دارند، سیستم کارستی دارای عملکرد بالایی است، شدت جریان آب زیرزمین بالا است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]



شکل۷. ارزیابی آسیب‌پذیری حوضه‌های الشتر و نورآباد به‌واسطه عوامل P و R (به ترتیب از راست)



شکل ۸. ارزیابی آسیب‌پذیری حوضه‌های الشتر و نورآباد به‌واسطه عوامل I و Ka (به ترتیب از راست)

ارزیابی نهایی آسیب‌پذیری آبخوان‌های الشتر و نورآباد با استفاده از روش PaPRIKa، نشان می‌دهد که محدوده مطالعاتی به پنج طبقه آسیب‌پذیر با درجات (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم) تقسیم شده است. به‌طوری‌که از مجموع مساحت ۲۱۶۸ کیلومترمربعی محدوده مورد مطالعه، ۵۹۰ کیلومترمربع، معادل ۲۷/۳ درصد در رده خطر آسیب‌پذیری خیلی کم قرار دارند. همچنین ۴۴۷/۶ کیلومترمربع (۲۰/۶ درصد) در رده آسیب‌پذیری کم قرار دارند. طبقه آسیب‌پذیری متوسط ۴۸۳/۵ کیلومترمربع(۲۲/۳ درصد) از مساحت محدوده تاقدیس گرین را دربر گرفته است. در نهایت اینکه طبقات با آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد به ترتیب دارای۳۶۹ کیلومترمربع(۱۷درصد) و ۲۷۷/۸ کیلومترمربع (۱۲/۸ درصد) مساحت بوده است. بیشترین مساحت محدوده آسیب‌پذیر در طبقه با آسیب‌پذیری خیلی کم قرار دارد که این محدوده‌ها بر دشت-های با پوشش آبرفت‌های عهد حاضر و سطوح هموار دامنه‌ای با شیب کمتر ۷ درجه و نیز سطوح ارتفاعی ۱۴۸۰ تا حدود ۲۰۰۰ متری منطبق هستند. همچنین نواحی رأس تاقدیس گرین و ارتفاعات آن به علت تشکیل عوارض کارستی فراوان (دولین‌ها، درز و شکاف‌ها و مجاری کارستی توسعه یافته، پونور و جاما)، که نقش عمده‌ای در تمرکز جریان دارند و روند تکامل کارست در آن‌ها تکامل‌یافته‌تر است، از پتانسیل خطر آسیب‌پذیری خیلی زیادی برخوردار هستند. این نواحی فاقد لایه پوششی خاک بوده و پوشش گیاهی در آن از تراکم خیلی کمی برخوردار است. بنابراین سامانه‌های کارستی به‌طور مستقیم در ارتباط با بارش ورودی بوده در نتیجه خطر انتقال آلودگی و آسیب‌پذیری آبخوان‌ها به‌طور ذاتی در این مناطق بالا می‌رود. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت که ژئومورفولوژی کارست، مناطق توسعه‌یافته کارستی، همچنین وجود عوارض و اشکال کارستی همچون دولین‌ها، فروچاله‌ها، پولیه‌ها دارای بیشترین نقش در آسیب‌پذیری آبخوان‌های محدوده تاقدیس

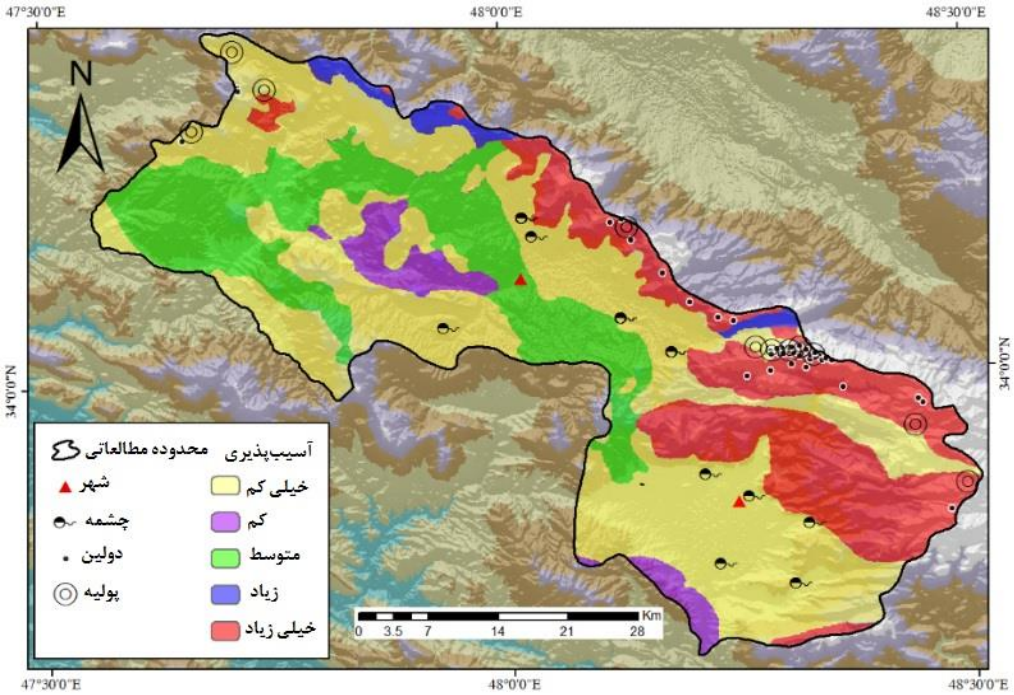
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

گرین می‌باشند. این محدوده‌ها که در طیف ارتفاعی ۲۸۵۰-۲۳۸۰ و ۳۶۰۰-۲۸۵۰ متری و شیب ۲۶ تا ۴۰ درجه قرار دارند، دارای بیشترین نزولات جوی (عمدتاً به‌صورت برف) است (جدول ۸ و شکل ۹).

جدول ۸. مساحت و درصد مناطق آسیب‌پذیر محدوده تاقدیس گرین به روش PaPRIKa

ردیف	آسیب‌پذیری	مساحت (KM^2)	مساحت (٪)
۱	خیلی زیاد	۲۷۷/۸	۱۲/۸
۲	زیاد	۳۶۹	۱۷
۳	متوسط	۴۸۳/۵	۲۲/۳
۴	کم	۴۴۷/۶	۲۰/۶
۵	خیلی کم	۵۹۰	۲۷/۳



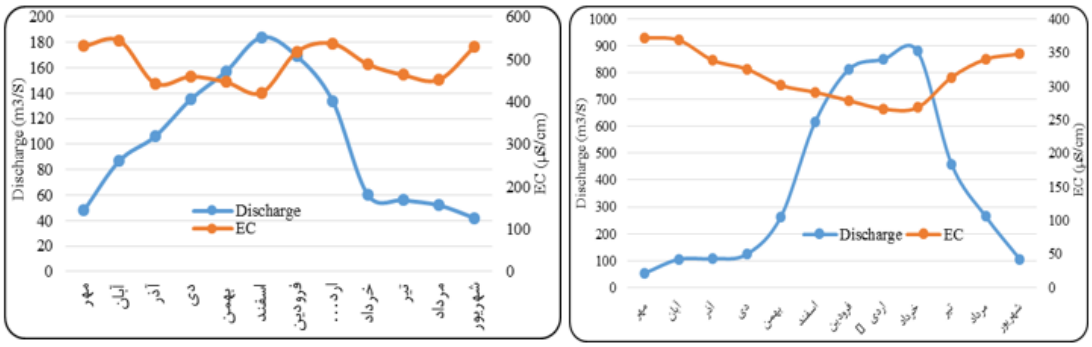
شکل ۹. پهنه‌بندی نهایی آسیب‌پذیری آبخوان‌های محدوده تاقدیس گرین به روش PaPRIKa

- **صحت سنجی**

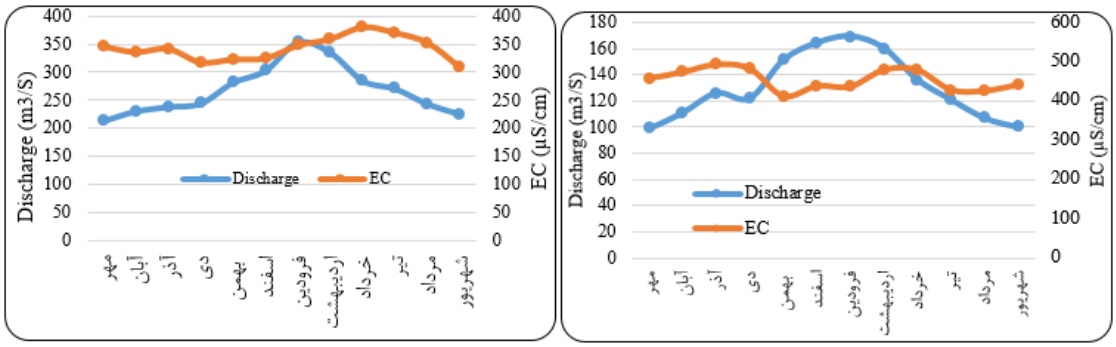
به‌منظور صحت سنجی نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی محدوده تاقدیس گرین از داده‌های هدایت الکتریکی (EC) و دبی ماهانه طی دوره آماری ۱۵ساله (۹۴-۱۳۸۰) چشمه‌های زز، آهنگران، نیاز و عبدالحسینی استفاده شده است. چشمه‌های زز و آهنگران در محدوده‌ای از تاقدیس گرین و در حوضه الشتر واقع شده‌اند که با توجه به نتایج روش PaPRIKa از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار هستند. با توجه به شکل (۱۰) افزایش دبی در چشمه‌های زز و آهنگران با کاهشEC همراه بوده و بالعکس کاهش دبی منجر به افزایش EC شده است. این وضعیت نشان‌دهنده پاسخ هیدرودینامیکی سریع چشمه‌های مذکور نسبت به تغذیه است. زیرا در آبخوان‌های توسعه‌یافته اختلاط آب سطحی با آب زیرزمینی از طریق جریان کانالی در فاصله کوتاهی باعث می‌شود که میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی کاهش یابد (Vias et al. ۲۰۰۶). در نتیجه با توجه به توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان این چشمه‌ها، می‌توان گفت که پتانسیل آسیب-

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

پذیری آلودگی در آبخوان چشمه‌های زز و آهنگران بالا است. اما در چشمه‌های نیاز و عبدالحسینی در حوضه نورآباد نمودار EC در برابر دبی ماهیانه تغییرات زیادی نداشته است. به‌عبارت‌دیگر تغذیه این چشمه‌ها نسبت به وقوع بارش با تأخیر زمانی انجام گرفته است. بنابراین از آسیب‌پذیری کمتری برخوردار بوده است. این موضوع نشان‌دهنده توسعه‌نیافتگی و یا توسعه اندک آبخوان چشمه‌های نیاز و عبدالحسینی است (شکل۱۱).



شکل۱۰. نمودار EC در برابر دبی ماهانه در چشمه‌های زز (راست) و آهنگران (چپ) در حوضه الشتر



شکل۱۱. نمودار EC در برابر دبی ماهانه چشمه‌های عبدالحسینی(راست) و نیاز (چپ) در حوضه نورآباد

نتیجه‌گیری

در محدوده تاقدیس گرین چشم‌اندازهای کارستی حاصل دخالت مشترک فرایندهای مورفودینامیک درونی و بیرونی، عوامل اقلیمی و سنگ‌شناسی در طی زمان است. به‌عبارت‌دیگر با توجه به فراهم بودن شرایط مناسب کارست‌زائی، ازجمله سنگ‌شناسی، تکتونیک فعال، اقلیم و شرایط ژئومورفولوژیکی مناسب، اشکال کارستی متنوعی در این محدوده شکل گرفته است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر توسعه ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌ها و ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب کارستی در محدوه حوضه‌های الشتر و نورآباد در استان لرستان انجام گرفته است. جهت دسترسی به اهداف تحقیق در مرحله اول پهنه‌بندی توسعه و ارزیابی ژئومورفولوژی کارست با مدل فازی و عملگر گاما انجام شد. همچنین با تحلیل مدل رقومی ارتفاع (DEM) و به به‌کارگیری مدل منحنی‌های بسته CCLs و تکمیل این مطالعات با پیمایش‌های میدانی، توزیع فضایی اشکال کارستی دولین در محدوده مورد مطالعه مدل‌سازی شدند. در مرحله بعد با به‌کارگیری روش PaPRIKa آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی حوضه‌های الشتر و نورآباد پهنه‌بندی گردید. عوامل چهارگانه این روش در محیط نرم‌افزار Arc GIS ۱۰،٤ ارزش‌گذاری، طبقه‌بندی و همپوشانی گردیده و نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های مورد مطالعه تهیه شد. در مرحله نهایی به‌منظور صحت‌سنجی و راستی آزمایی نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی، از داده‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

هیدروشیمیایی چشمه‌های زز، آهنگران، نیاز و عبدالحسینی استفاده شد. برای این منظور هدایت الکتریکی (EC) ماهانه در برابر دبی ماهانه طی یک دوره آماری ۱۵ساله ارزیابی شده است. ارزیابی ژئومورفولوژی کارست تاقدیس گرین گویای این است که چاله‌های بسته به‌ویژه دولین‌ها در ابعاد و انواع (ریزشی، انحلالی، ریزشی- پوششی و فرونشستی) ازجمله فراوان-ترین اشکال کارستی تیپیک می‌باشند.

ارزیابی نهایی آسیب‌پذیری آبخوان‌های الشتر و نورآباد با استفاده از روش PaPRIKa نشان می‌دهد که محدوده مطالعاتی به پنج طبقه آسیب‌پذیر با درجات (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم) تقسیم شده است. به‌طوری‌که نواحی با خطر آسیب‌پذیری خیلی کم و کم به ترتیب ۲۷/۳ و ۲۰/۶ درصد از مجموع مساحت ۲۱۶۸ کیلومترمربعی محدوده را شامل شده‌اند. طبقه آسیب‌پذیری متوسط ۲۲/۳ درصد از مساحت محدوده تاقدیس گرین را در برگرفته است. در نهایت اینکه طبقات با آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۷ و ۱۲/۸ درصد از مساحت محدوده را به خود اختصاص داده‌اند. طبقه با آسیب‌پذیری خیلی کم منطبق بر آبرفت‌های عهد حاضر و سطوح هموار دامنه‌ای با شیب کمتر از ۷ درجه بوده است. همچنین نواحی رأس تاقدیس گرین و ارتفاعات آن به علت فقدان لایه پوششی خاک و گیاه، بارش زیاد برف و تشکیل عوارض کارست نیوال (ازجمله دولین‌ها) از پتانسیل خطر آسیب‌پذیری خیلی زیادی برخوردار هستند. بنابراین سامانه‌های کارستی به‌طور مستقیم در ارتباط با بارش ورودی بوده در نتیجه خطر انتقال آلودگی و آسیب‌پذیری آبخوان‌ها به‌طور ذاتی در این مناطق بالا می‌رود. در تاقدیس گرین تغییرات میزان آسیب‌پذیری با ژئومورفولوژی کارست و میزان توسعه کارست ارتباطی مستقیم دارد. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت که مناطق توسعه‌یافته کارستی، همچنین وجود عوارض و اشکال کارستی ازجمله دولین‌ها، فروچاله‌ها، پولیه‌ها، منطبق بر نواحی با آسیب‌پذیری بالا می‌باشند. صحت‌سنجی نتایج ارزیابی آسیب-پذیری آبخوان‌های کارستی با داده‌های EC و دبی ماهانه چشمه‌ها نشان داده است که چشمه‌های زز و آهنگران در محدوده با آسیب‌پذیری بالا واقع شده‌اند. در این چشمه‌ها افزایش دبی با کاهش EC همراه بوده و بالعکس کاهش دبی منجر به افزایش EC شده است. این وضعیت نشان‌دهنده توسعه‌یافتگی آبخوان و در نتیجه پاسخ هیدرودینامیکی سریع چشمه‌های مذکور نسبت به تغذیه است. در نتیجه پتانسیل آسیب‌پذیری آلودگی در آبخوان چشمه‌های زز و آهنگران بالا است. اما در چشمه‌های نیاز و عبدالحسینی در حوضه نورآباد نمودار EC در برابر دبی ماهانه تغییرات زیادی نداشته است. به‌عبارت‌دیگر تغذیه این چشمه‌ها نسبت به وقوع بارش با تأخیر زمانی انجام گرفته است. بنابراین از آسیب‌پذیری کمتری برخوردار بوده است. این موضوع نشان‌دهنده توسعه‌نیافتگی و یا توسعه اندک آبخوان چشمه‌های نیاز و عبدالحسینی بوده است. با توجه به نقش عوارض و اشکال کارستی به‌ویژه چاله‌های بسته در بالا بردن پتانسیل آسیب‌پذیری محدوده تاقدیس گرین ضروری است تا اقدامات مدیریتی و حفاظتی در این زمینه انجام گیرد. ازجمله تعیین حریم حفاظتی لندفرم‌های سطحی (دولین‌ها، پونورها، حفرات بلعنده و شافت‌ها) و آبخوان‌های کارستی از آلودگی‌های انسانی بر مبنای تعامل ارگان‌ها و سازمان‌های ذی‌ربط با در نظر گرفتن شرایط محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی در قالب پروژه‌ها و طرح‌های سازمان‌یافته انجام گیرد. بسیاری از چشمه‌های موردبررسی به دلیل نزدیکی به جوامع انسانی در معرض آسیب می‌باشند که از آن جمله عدم وجود سیستم دفع فاضلاب برای مناطق روستایی و شهری اطراف چشمه‌ها و دفع غیراصولی زباله‌ها و شیرابه ناشی از آن سبب تأثیر بر کیفیت آب زیرزمینی می‌شود. لذا ایجاد زیرساخت‌های مرتبط با بهداشت محیط می‌تواند در حفاظت از منابع آب زیرزمینی منطقه موثر باشد. همچنین جلوگیری از چرای غیراصولی دام‌ها و دفع فضولات حیوانی و انتقال سریع آن‌ها از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

طریق دولین‌ها، پونورها، حفرات بلعنده و شافت‌ها به درون آبخوان‌های کارستی می‌تواند در حفظ کیفیت این منابع موثر باشد. تعیین حوضه آبگیر چشمه‌ها و تفکیک حدود آبگیر چشمه‌های کارستی از چشمه‌های آبرفتی به کمک مطالعات ایزوتوپ، ردیاب‌های رنگی، روش‌های ژئوالکتریک و ژئوفیزیک، روش‌هایی موثر در حفاظت کیفی منابع آب آبخوان‌های کارستی محدوده مورد مطالعه است.

منابع

دسترنج، علی؛ احمد نوحه‌گر، آرش ملکیان، حمید غلامی و مریم جعفری اقدم. ۱۳۹۶. ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان کارستی دالاهو. *مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، **۸ (۲)**: ۱۶-۱.

رنگزن، کاظم؛ علی محرابی‌نژاد، فرشاد علیجانی و زهره استاد هاشمی. ۱۳۹۶. آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی جنوب شرق ایذه با استفاده از روشCOP . *مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، **۲۳**: ۲۸-۲۰.

زنگنه اسدی، محمد علی؛ نادیا بقائی‌نژاد، شیرین غلام پور و علی بهشتی قله‌زو. ۱۳۹۴. تهیه نقشه آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان بقیع خراسان رضوی به دو روشCOP و PaPRIKa با استفاده از سنجش از دور وGIS . *مجله مهندسی منابع آب*، **۸**: ۳۰-۲۳

سلطانی، شکور؛ ایثار نورایی صفت، طاهر ولی‌پور، عبدالکریم ویسی و احمد عباسیان. ۱۳۹۳. ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان‌های کارستی ماراب با استفاده از مدل RISKE و تحلیل سری زمانی. *مجله دانش مخاطرات*، **۱**: ۸۲-۶۹.

سیف، عبداله؛ مریم جعفری اقدم و علی جهانفر.۱۳۹۳. ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با استفاده از مدل COP (مطالعه موردی: آبخوان کارستی گُلین، استان کرمانشاه). *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، **۳(۳)**: ۷۹-۶۵.

فرزین، محسن و سعیده منبری. ۱۳۹۷. پهنه‌بندی حفاظتی آبخوان کارستی تنگه کناره یاسوج با روش COP. مجله *مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران*، **۷۱ (۲)**: ۴۵۵-۴۳۹.

Abdullah, T. O; S. S. Ali, N. A. Al-Ansari, and S. Knutsson. ۲۰۱٦. Groundwater Vulnerability Using DRASTIC and COP Models: Case Study of Halabja Saidsadiq Basin, Iraq. *Journal of Engineering*, ۸: ۷٤۱-۷٦۰.

Adams, B and S.S.D. Foster. ۱۹۹۲. Land-surface zoning for groundwater protection. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, Vol.٦, Pp. ۳۱۲–۳۲۰.

Afrasiabian, A. ۲۰۰۷. The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran, *Environ Geology*, **٥۲**: ٦۷۳–٦۷۷.

Aller. L.; T. Bennett, J.H. Lehr, and R.J. Petty. ۱۹۸۷. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. US Environmental Protection Agency, Oklahoma.

Bagherzadeh, S.; N. Kalantari, A. Fadaei Nobandegani, Z. Derakhshan, G. Contio, M. Ferrante, and R. Malekahmadi. ۲۰۱۸. Groundwater vulnerability assessment in karstic aquifers using COP method, Journal of Environmental Science and Pollution Research Basin. Xinjiang, Northwest China, *Environmental Earth Science*, ٦۰(٥): ۱۰٥٥-۱۰٦۳.

Bekesi, G, and J. M. Conchie. ۲۰۰۰. Empirical assessment of influence of the unsaturated zone on aquifer vulnerability, Manawatu region, New Zealand. *Ground Water*, **۳۸**(۲):۱۹۳-۱۹۹.

Beynen, V.; M. Niedzielski, E. Jelinska, K. Alsharif, and J. Matusick. ۲۰۱۲. Comparative study of specific Ground water vulnerabity of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography*, **۳۲**: ۸٦۸-۸۷۷.

Calic, J. ۲۰۱۱. Karstic uvula revisited: Toward a redefinition of the term, *Journal of Geomorphology*, **۱۳٤ (۱)**: ۳۲-٤۲.

Civita M. ۱۹۹٤. Aquifer Vulnerability maps to pollution, Pitagora Ed., Bologna. Developing countries: A case study in northern Costa Rica. *Journal of Hydrology*, **۳۳٤**:۱۰۹-۱۲٤.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]

Doerfliger N.; P.Y. Jeannin and F. Zwahlen. ۱۹۹۹. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environ Geology*, **۳۹** (۲):۱٦٥-۱۷٦.

Ford. D and P. Williams. ۲۰۰۷. Karst Hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons Ltd ۱-٥٦۲.

Huneau, F.; J. Jaunat, K. Kavouri, V. Plagnes, F. Rey and N. Dörfliger, ۲۰۱۳. Intrinsic vulnerability mapping for small mountainous karst aquifers, implementation of the new PaPRIKa method to Western, *Journal of Engineering Geology*, **۱٦۱**: ۸۱–۹۳.

Kattaa, B.; W. Al-Fares, A. AlCharideh. ۲۰۱۰. Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method. *Journal of Environmental Management*, **۹۱**:۱۱۰۳–۱۱۱۰.

Kavouri, K.; V. Plagnes, J. Tremoulet, N. Dörfliger, F. Rejiba, and P. Marchet. ۲۰۱۱. PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouysse karst system (southwest France). *Journal of Hydrogeology*, **۱۹** (۲): ۳۳۹-۳٥۳.

Marin, A.I.; N. Dorfliger, and B. Andreo. ۲۰۱۲. Comparative application of two method (COP and PAPRIKA) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain). *Environ. Earth Sci*, **٦٥**: ۲٤۰۷- ۲٤۲۱.

Milanovic, P.; ۲۰۰٤. Water resources engineering in karst. CRC Press.

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). *Journal of Hydrology*, **۳۹۷**(۳): ۲٦۳-۲۸۰.

Radutu, A.; D. Gaitanaru, M. Vlaicu, C. Iliescu, and C. Radu. ۲۰۱۸. Vulnerability Assessment of the Zaton - Bulba karst Aquifer, a Basis to define its protection areas, *AgroLife Scientific Journal*, **۷** (۱): ۱۰٥-۱۱٤.

Raeisi, E. ۲۰۰۸. Groundwater storage calculation in karst aquifers with alluvium or No-flow boundaries. *Cave and karst science*, **٦۳**(۳).

Stigter, T.Y.; L. Ribeiro, and A. M. Carvalho Dill. ۲۰۰٦. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinization and nitrate contamination level in two agriculture regions in the south of Portugal. *Hydrogeology* Journal, **۱٤** :۷۹-۹۹.

Vias, J. M.; B. Andreo, M. J. Perles, F. Carrasco, I. Vadillo, and P. Jimenez. ۲۰۰٦. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method: Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology* Journal, **۱٤**: ۹۱۲-۹۲٥.

Waele, J.D.; L. Plan, and P. Audra, ۲۰۰۹. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction, *Geomorphology*, **۱۰٦**:۱–۸.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.1.37]