

مخاطره محیطی آسیب‌پذیری ذاتی منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر ژئومورفولوژی کارست

(مطالعه موردی: حوضه‌های الشتر و نورآباد)

امیر صفاری^۱؛ 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

پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۰۶

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 حوضه‌های 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 خیلی کم، کم و متوسط به ترتیب ۲۷/۳، ۲۰/۶ و ۲۲/۳ درصد از مساحت محدوده تاقدیس گرین را در بر گرفته است. همچنین ۱۷ و 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.

واژه‌های کلیدی: تاقدیس گرین، ژئومورفولوژی، کارست، لرستان، روش PaPRIKa

مقدمه

کارست حاصل عملکرد فعالیت‌های انحلالی (فیزیکی و شیمیایی) در گستره سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) و همچنین سنگ‌های سولفات‌ه و کلروه 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, ۲۰۰۴). سازندهای کارستی به دلیل قابلیت انحلال‌پذیری نقشی اساسی در تغذیه منابع آب‌های زیرزمینی دارند. به عبارتی 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. به طوری که در حدود ۲۷ درصد جمعیت جهان از ذخایر آب کارستی استفاده می‌کنند (Ford & Milanovic, ۲۰۰۴). Raeisi, ۲۰۰۸; Afrasiabian, ۲۰۰۷; and Williams, ۲۰۰۷). 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 مجرای 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, ۱۹۹۴). به عبارت دیگر 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 از جمله 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 به منظور 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 و GIS 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. از جمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

DRASTIC (Aller et al. ۱۹۸۷); GOD (Foster, ۱۹۸۷); SINTACS (Civita, ۱۹۹۴); EPIK (Doerflinger and Zwahlen, ۱۹۹۸); PI (Goldscheider et al. ۲۰۰۰); RISK (Petelet et al. ۲۰۰۰); SI (Stigter, ۲۰۰۶); COP (Vias et al. ۲۰۰۶); PaPRIKa (Kavouri et al. ۲۰۱۱).

پژوهش‌های متعدد در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با روش‌های مختلف انجام گرفته است. از جمله: (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. (Vilas et al. ۲۰۰۹) مدل COP را به منظور 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) به منظور 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 روش COP مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج گویای اینست که مناطق شرقی کمترین میزان آسیب‌پذیری و مناطق شمال غرب بالاترین میزان آسیب‌پذیری را دارا می‌باشند. به عبارتی بیش از ۶ درصد منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین خطر آسیب‌پذیری است. دسترنج و همکاران (۱۳۹۶) در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی دالاهو به روش COP 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. از جمله: Abdullah et al. ۲۰۱۶; Huneau et al. ۲۰۱۳. سیف و همکاران (۱۳۹۳)، سلطانی و همکاران (۱۳۹۳)، زنگنه اسدی و همکاران (۱۳۹۴)، رنگزن و همکاران (۱۳۹۶).

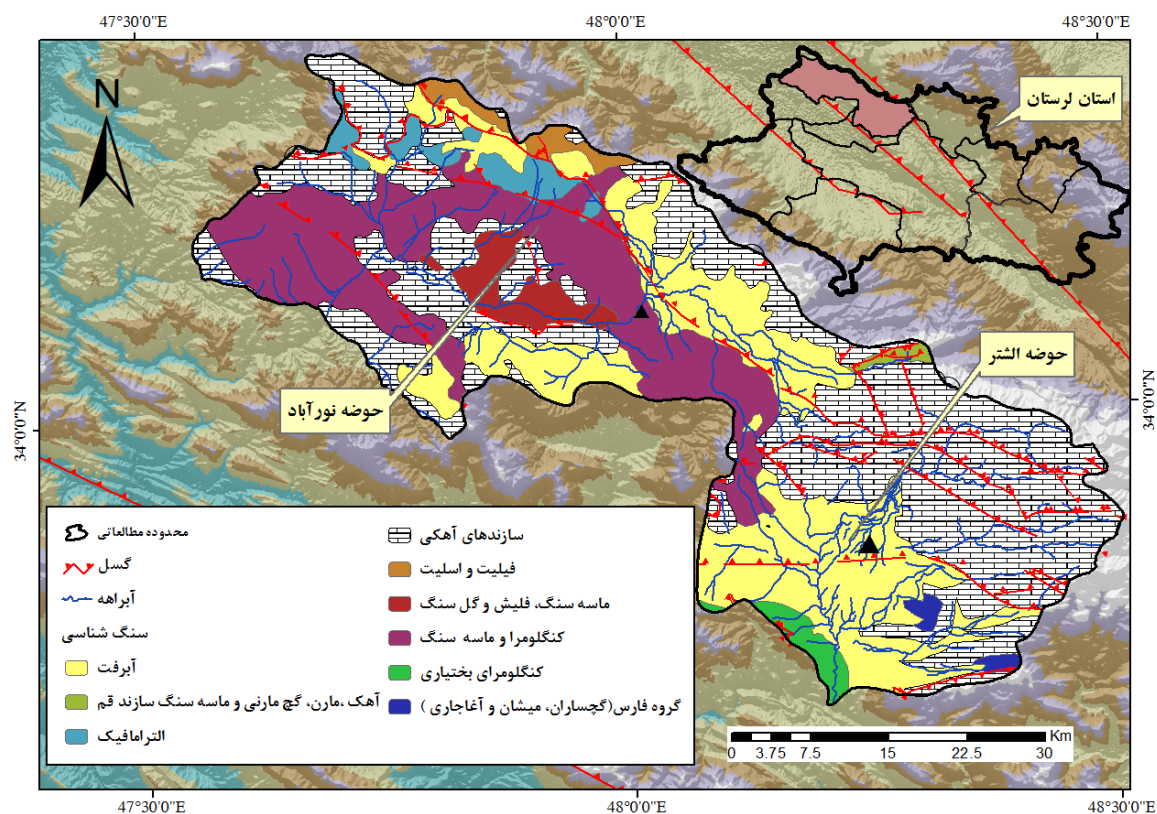
پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ذاتی منابع آب آبخوان‌های کارستی در حوضه‌های الشتر و نورآباد در محدوده تاقدیس گرین (استان لرستان) با استفاده از روش PaPRIKa است.

^۱ Arid^۲ Sierra^۳ Kavi

داده‌ها و روش کار

• منطقه مورد مطالعه

قسمت عمده تاقدیس گرین به لحاظ تقسیم‌بندی واحدهای مهم زمین‌شناختی و ساختمانی ایران، در زون زاگرس مرتفع قرار گرفته 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 بر گرفته‌اند. 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 در حوضه 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 لایه‌هایی که همگی تحت تأثیر فاز شدید دگرگونی قرار گرفته‌اند؛ محدود می‌شود (شکل‌های ۱ و ۲).



شکل ۱. زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه



شکل ۲. 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 راستی‌آزمایی 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 به‌کارگیری مدل منحنی‌های بسته^۱ CCLs، 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

^۱ Closed Contour Lines

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 راستی‌آزمایی گردید. مدلسازی دولین‌ها و چاله‌های بسته در محیط در نرم‌افزار ArcGIS ۱۰.۴ با به‌کارگیری مدل منحنی‌های بسته CCLs 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. از جمله 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. به عبارت 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 (رابطه ۱) (مؤمنی، ۱۳۹۶: ۱۹۷).

$$\mu_A = \begin{cases} 1, & \text{if } X \in A \\ 0, & \text{if } X \notin A \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

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 مؤثر انتخاب شدند. بنابراین ابتدا تک‌تک لایه‌ها با توجه به هدف موردنظر بر اساس توابع عضویت، فازی سازی شده و ارزشی بین ۰ و ۱ 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 ArcGIS ۱۰.۴ 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 ArcGIS ۱۰.۲ قابل اجرا 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.

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

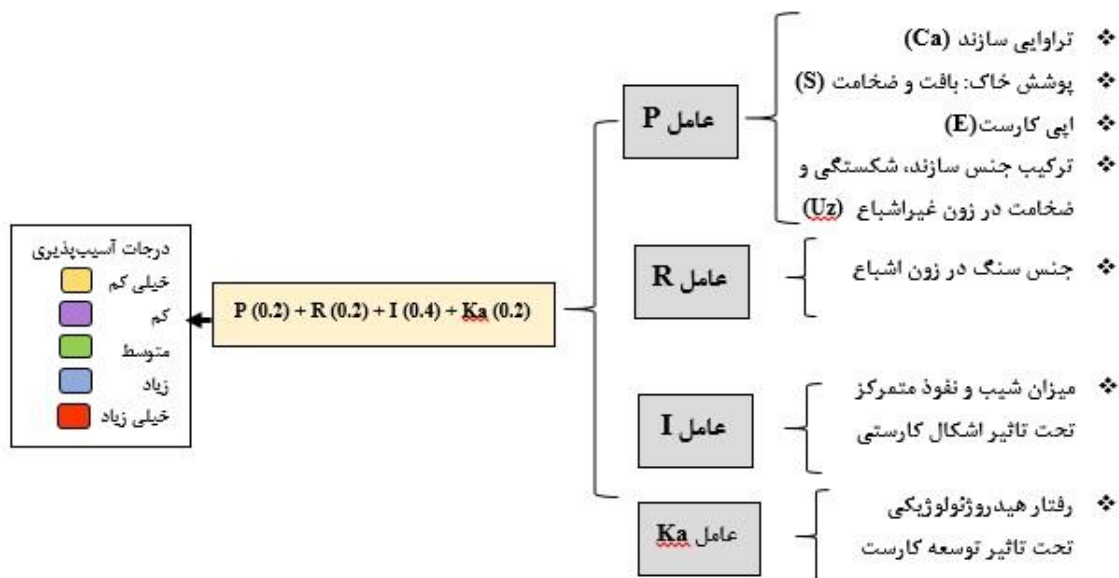
در این رابطه $\mu_{\text{Combination}}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده صفر و یک است

- ارزیابی آسیب‌پذیری به روش PaPRIKa

روش PaPRIKa بر اساس چهار عامل: P^1 (لایه‌های بالایی محافظ آب‌های زیرزمینی)، R^2 (نوع سنگ در زون اشباع) I^3 (نفوذ سطحی) و Ka^4 (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) (شکل ۳). همه مراحل ارزش‌گذاری و تهیه نقشه عوامل چهارگانه روش PaPRIKa در نرم‌افزار Arc GIS انجام

گرفته است. رابطه (۳) $P \times 0,2 + R \times 0,2 + I \times 0,4 + Ka \times 0,2$



شکل ۳. 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

شرح و تفسیر نتایج

• ژئومورفولوژی کارست محدوده تاقدیس گرین

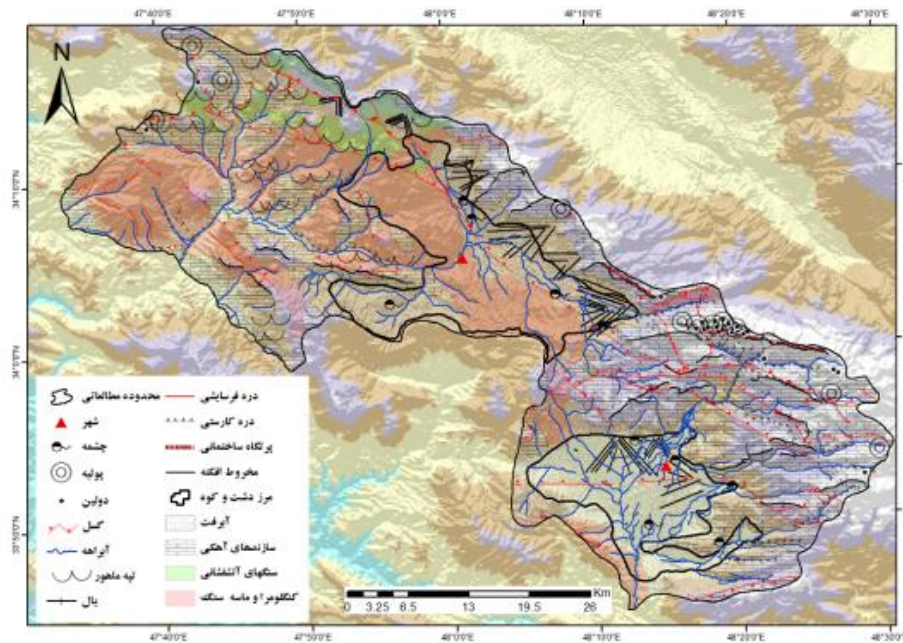
در محدوده تاقدیس گرین چشم‌اندازهای کارستی حاصل دخالت مشترک فرایندهای مورفودینامیک درونی و بیرونی، عوامل اقلیمی و سنگ‌شناسی در طی زمان است. تکتونیک منطقه گرین در ارتباط با تکوین زاگرس و کمربند کوهزایی آن است. وجود گسل‌های گاماسیاب، گرین- گاماسیاب و گرین- کهمان، منطقه گرین را به شدت تکتونیزه نموده است. به طوری که حرکات تکتونیک 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 کارست‌زایی، از جمله 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 از جمله 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 فرونشستی) است؛ که تحت عنوان کلی کارست نیوال^۲ شناخته شده‌اند (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴. نمونه‌ای از کارست نیوال در ارتفاعات گرین (مقیاس: سایه عکاس)

^۱ Ponor or Swallow Hole

^۲ Nival Karst



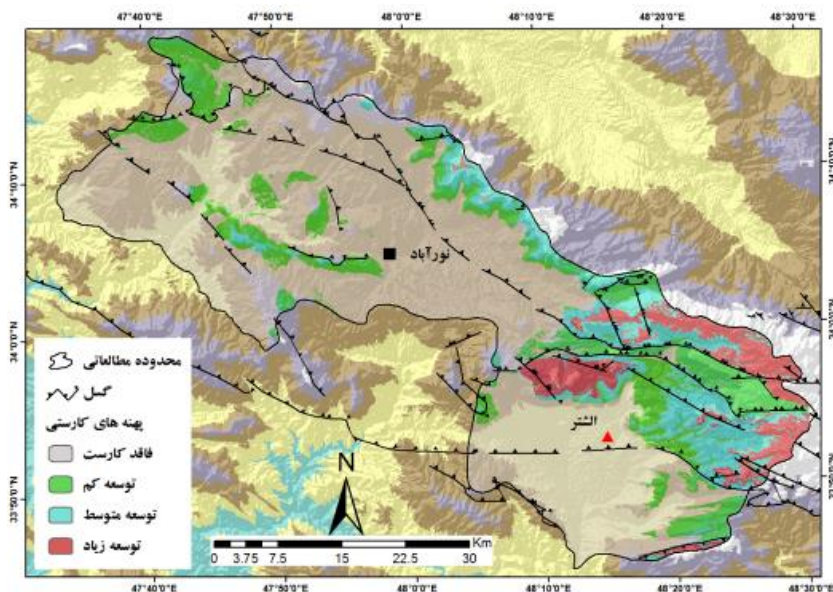
شکل ۵. نقشه ژئومورفولوژی کارست محدوده ناقدیس گرین (مأخذ: نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و پیمایش میدانی)

• 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 کیلومتر مربع، ۵۶/۶ درصد)، نواحی با توسعه کم (۳۵۱ کیلومتر مربع معادل ۱۶/۲ درصد)، نواحی با توسعه متوسط (۲۶۵ کیلومتر مربع، ۱۲/۲ درصد) و در نهایت پهنه‌های با توسعه زیاد (معادل ۳۲۵ کیلومتر مربع، ۱۵ درصد) تقسیم شده است (شکل ۶ و جدول ۱).

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

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



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 اپی کارست) و Uz (ترکیبی از جنس سازند، ضخامت و شکستگی در زون غیراشباع) است. برای تهیه نقشه عامل P 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 ۱:۱۰۰۰۰۰ جنس سازندها مشخص و نسبت به کمی نمودن آن‌ها در نرم در نرم‌افزار Arc GIS ۱۰٫۴ 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 آئوسن) و همچنین آبرفت‌های کواترنری است. زیرعامل‌های عامل P با توجه به جداول (۲ تا ۴) ارزش‌گذاری و پهنه‌بندی شده است (شکل ۷).

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

| بافت خاک | | | درصد گراول | خصوصیات نفوذپذیری | | طبقه |
|----------|------------|----|-------------|--|--|-----------------|
| ماسه | سیلت و لوم | رس | | سازندهای با نفوذپذیری بالا: شن و ماسه و آبرفت | | |
| ۲ | ۱ | ۱ | ۰ - ۱۵ | سازندهای با نفوذپذیری متوسط: آهک‌های کارستی | | Ca ₂ |
| ۳ | ۲ | ۱ | ۱۵-۶۰ | سازندهای با نفوذپذیری کم: ماسه سنگ، کنگلومراها، سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی | | Ca ₃ |
| ۳ | ۳ | ۲ | بیشتر از ۶۰ | سازندهای با نفوذپذیری خیلی کم: رس و مارن | | Ca ₄ |

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

| شاخص | خصوصیات | طبیعت خاک | | | | شاخص خاک زیر فاکتور S | |
|----------------|--|-----------|---|---|---|-----------------------|----------|
| | | ۰ | ۱ | ۲ | ۳ | سازندهای غیرقابل نفوذ | عمق نفوذ |
| E ₁ | آبخوان معلق با سطح پیژومتري بالا | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | بیشتر از ۵ متر | ۰-۲۹cm |
| E ₂ | آبخوان آبی کارست، گسترش جانبی محدود با چشمه‌های موقتی با نرخ جریان ۱ لیتر بر ثانیه و بیشتر | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱-۵ متر | |
| E ₃ | آبخوان آبی کارست، گسترش جانبی محدود با چشمه‌های با نرخ جریان کم | ۳ | ۲ | ۱ | ۱ | ۶۰-۹۹cm | |
| E ₄ | فاقد آبی کارست | ۴ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳۰-۵۹cm | |
| | | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۰-۲۹cm | |

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

| شاخص | خصوصیات |
|------------------|---|
| LUZ _۰ | لایه‌های ضخیم رسی |
| LUZ _۱ | رس، مارن و آهک مارنی (۲۵ تا ۳۰٪ کانی‌های رسی) |
| LUZ _۲ | آهک مارنی (۱۰ تا ۲۵٪ کانی‌های رسی) |
| LUZ _۳ | 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 مشخص شده است (جدول ۵ و شکل ۶).

جدول ۵. خصوصیات عامل R (Kavouri et al. ۲۰۱۱)

| امتیاز | خصوصیات |
|--------|--|
| ۱ | تأثیر کم بر روی آسیب‌پذیری: سنگ آهک مارنی (۲۵ تا 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. |

عامل I نقش پارامترهای میزان شیب و نفوذ متمرکز به‌واسطه اشکال کارستی موجود در ارتفاعات تاقدیس‌گرین از جمله: دولین‌ها، پهنه‌های کارنی، گرایک‌ها، شکستگی‌ها و حفرات بلعنده و جریان فرورو^۱ که تأثیر عمده‌ای در نفوذپذیری و آسیب‌پذیری 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

^۱-Stream-Sink

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 (جدول ۶ و شکل ۷).

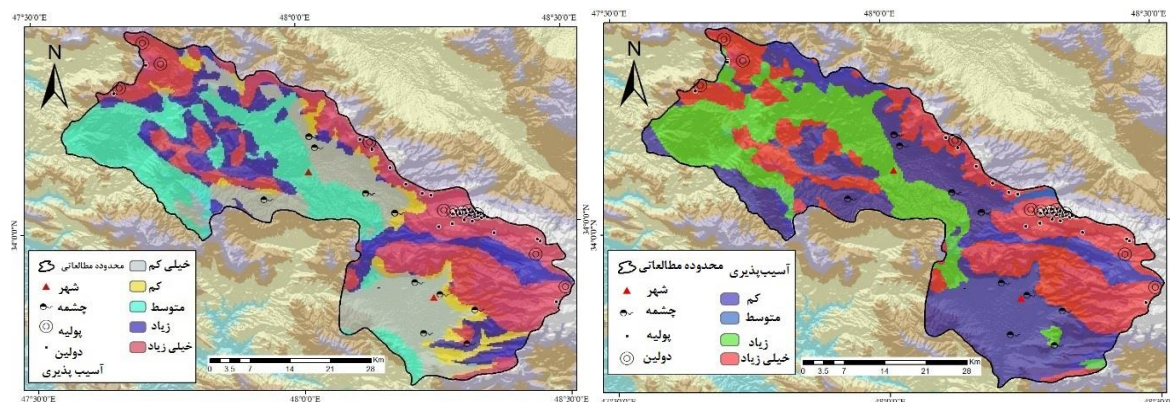
جدول ۶. خصوصیات عامل I (Kavouri et al. ۲۰۱۱)

| فاکتور I | خصوصیات |
|----------------|---|
| I _۱ | شیب بیشتر از ۵۰٪ با نفوذ سطحی کم و تغذیه اصلی از رواناب |
| I _۲ | شیب ۵۰-۱۵٪ تحت تأثیر رواناب |
| I _۳ | شیب ۱۵-۵٪، رواناب محدود به نواحی کربناته است (دره‌های خشک و پهنه‌های کارنی) |
| I _۴ | شیب ۵-۰٪ نفوذ سطحی به واسطه رواناب‌ها، دولین‌ها، پولیه‌ها و کارن‌ها، توسعه عمودی شیپارها و مجراها |
| I _۵ | حفره‌های کم عمق و فروچاله‌ها با نفوذ سطحی متمرکز |

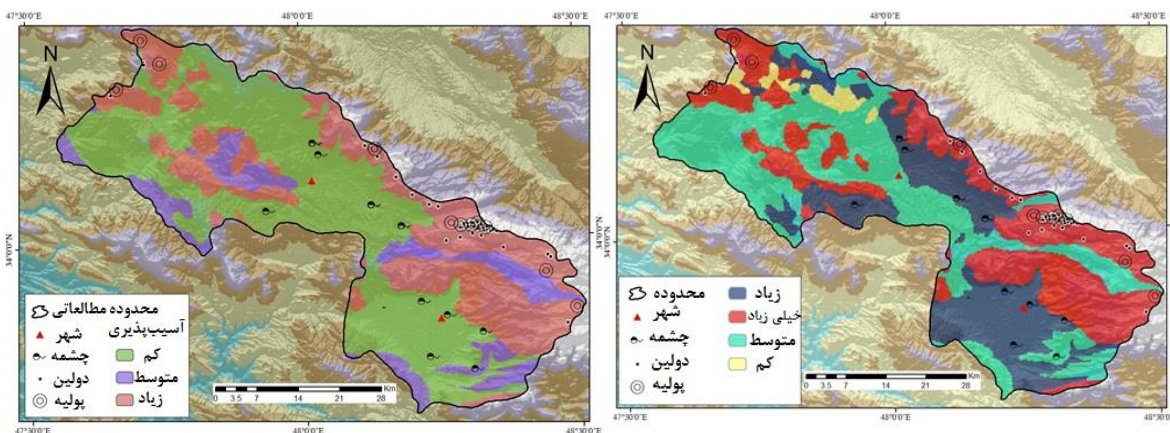
عامل Ka نشان‌دهنده رفتار هیدروژئولوژیکی محیط‌های کارستی تحت تأثیر توسعه کارست و ظرفیت زهکشی شبکه‌های کارستی است. به عبارت دیگر عامل Ka تعیین‌کننده ظرفیت زهکشی و شبکه مجاری کارستی است که بر پایه آنالیزهای هیدروگراف و یا آزمون ردیاب‌های مصنوعی تعیین می‌گردد. کارست پدیده فرسایشی است که سازوکار آن انحلال و خوردگی توده سنگ‌های کربناته به واسطه اسید کربنیک محلول در آب است. در آب‌وهوای سرد به علت افزایش ظرفیت انحلالی اسید کربنیک و کاهش Ph آب، خوردگی و انحلال آب و در نتیجه توسعه کارست افزایش می‌یابد. بنابراین هر چه کارست توسعه یافته‌تر 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 تجزیه و تحلیل منحنی آبنمود چشمه‌های منتخب در یک دوره زمانی ۱۵ ساله (۹۴-۱۳۸۰) و همچنین نتایج پهنه‌بندی توسعه کارست (شکل ۵) برای تعیین عامل Ka استفاده شده است (جدول ۷ و شکل ۸).

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

| کارست‌زایی | خصوصیات |
|-----------------|---|
| Ka _۱ | حوضه‌های با مساحت کمتر از ۱۰ کیلومتر مربع با میانگین دبی سالانه پایین و در آن سیستم کارستی دارای نوسان کم بوده و شواهد جریان سریع آب زیرزمینی وجود ندارد |
| Ka _۲ | حوضه‌های با مساحت بیشتر از ۱۰ کیلومتر مربع بدون تلفات آب، رفتار عملکردی پایین |
| Ka _۳ | حوضه‌های با مساحت بیشتر از ۱۰ کیلومتر مربع که در آن سیستم کارستی دارای عملکرد بالایی است، شبکه زهکشی زیرزمینی به خوبی توسعه یافته که با سطح زمین ارتباط نسبی دارد. |
| Ka _۴ | حوضه‌های با مساحت کمتر یا بیشتر از ۱۰ کیلومتر مربع، شبکه‌های زهکشی زیرزمینی به خوبی توسعه یافته و دارای مجراهای بزرگی که با سطح زمین ارتباط دارند، سیستم کارستی دارای عملکرد بالایی است، شدت جریان آب زیرزمین بالا است. |



شکل ۷. ارزیابی آسیب پذیری حوضه های الشتر و نورآباد به واسطه عوامل P و R (به ترتیب از راست)



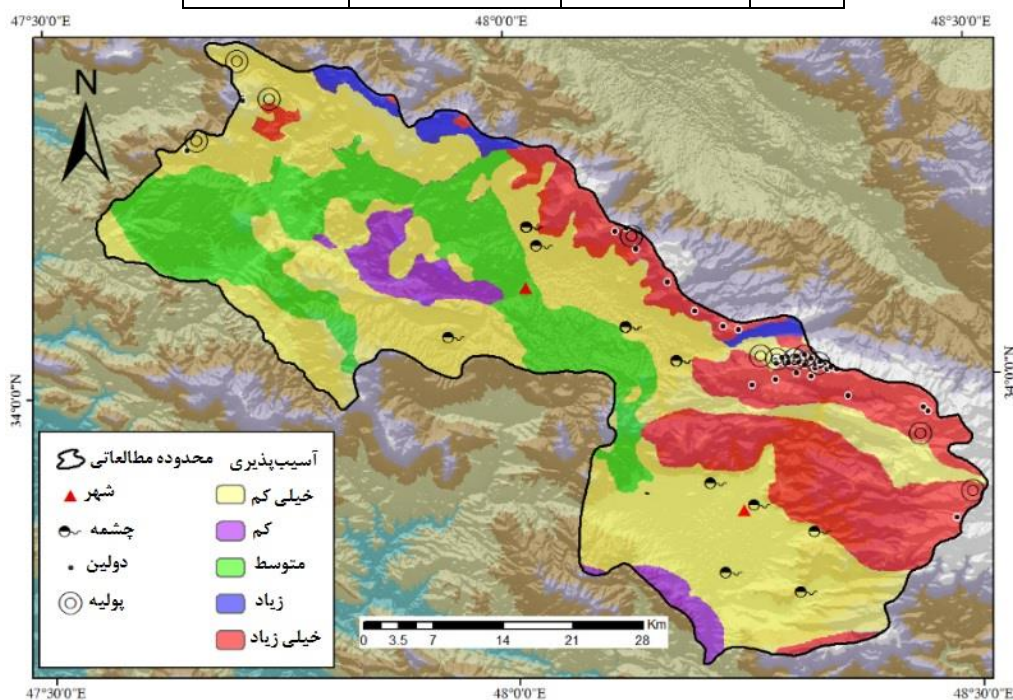
شکل ۸. ارزیابی آسیب پذیری حوضه های الشتر و نورآباد به واسطه عوامل I و Ka (به ترتیب از راست)

ارزیابی نهایی آسیب پذیری آبخوان های الشتر و نورآباد با استفاده از روش PaPRIKA، نشان می دهد که محدوده مطالعاتی به پنج طبقه آسیب پذیر با درجات (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم) تقسیم شده است. به طوری که از مجموع مساحت ۲۱۶۸ کیلومترمربعی محدوده مورد مطالعه، ۵۹۰ کیلومترمربع، معادل ۲۷/۳ درصد در رده خطر آسیب پذیری خیلی کم قرار دارند. همچنین ۴۴۷/۶ کیلومترمربع (۲۰/۶ درصد) در رده آسیب پذیری کم قرار دارند. طبقه آسیب پذیری متوسط ۴۸۳/۵ کیلومترمربع (۲۲/۳ درصد) از مساحت محدوده تقادیس گرین را دربر گرفته است. در نهایت اینکه طبقات با آسیب پذیری زیاد و خیلی زیاد به ترتیب دارای ۳۶۹ کیلومترمربع (۱۷ درصد) و ۲۷۷/۸ کیلومترمربع (۱۲/۸ درصد) مساحت بوده است. بیشترین مساحت محدوده آسیب پذیر در طبقه با آسیب پذیری خیلی کم قرار دارد که این محدوده ها بر دشت های با پوشش آبرفت های عهد حاضر و سطوح هموار دامنه ای با شیب کمتر ۷ درجه و نیز سطوح ارتفاعی ۱۴۸۰ تا حدود ۲۰۰۰ متری منطبق هستند. همچنین نواحی رأس تقادیس گرین و ارتفاعات آن به علت تشکیل عوارض کارستی فراوان (دولین ها، درز و شکاف ها و مجاری کارستی توسعه یافته، پونور و جاما)، که نقش عمده ای در تمرکز جریان دارند و روند تکامل کارست در آن ها تکامل یافته تر است، از پتانسیل خطر آسیب پذیری خیلی زیادی برخوردار هستند. این نواحی فاقد لایه پوششی خاک بوده و پوشش گیاهی در آن از تراکم خیلی کمی برخوردار است. بنابراین سامانه های کارستی به طور مستقیم در ارتباط با بارش ورودی بوده در نتیجه خطر انتقال آلودگی و آسیب پذیری آبخوان ها به طور ذاتی در این مناطق بالا می رود. به عبارت دیگر می توان گفت که ژئومورفولوژی کارست، مناطق توسعه یافته کارستی، همچنین وجود عوارض و اشکال کارستی همچون دولین ها، فروچاله ها، پولیه ها دارای بیشترین نقش در آسیب پذیری آبخوان های محدوده تقادیس

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 به صورت برف) است (جدول ۸ و شکل ۹).

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

| ردیف | آسیب‌پذیری | مساحت (KM ^۲) | 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 |

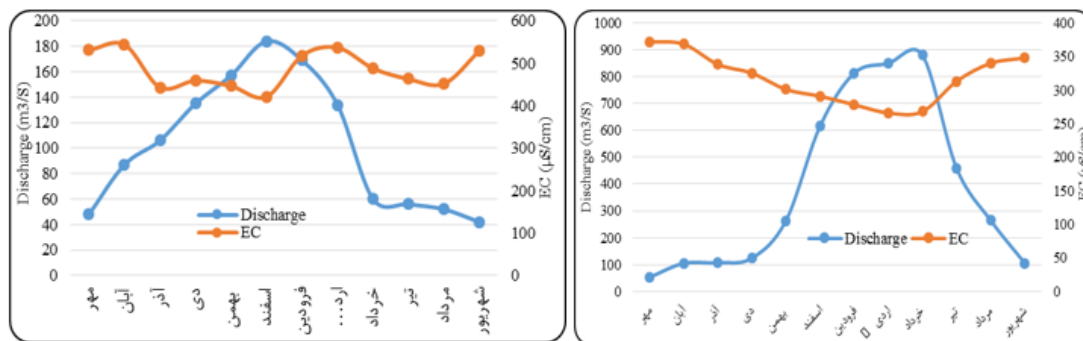


شکل ۹. پهنه‌بندی نهایی آسیب‌پذیری آبخوان‌های محدوده تاقدیس گرین به روش PaPRIKa

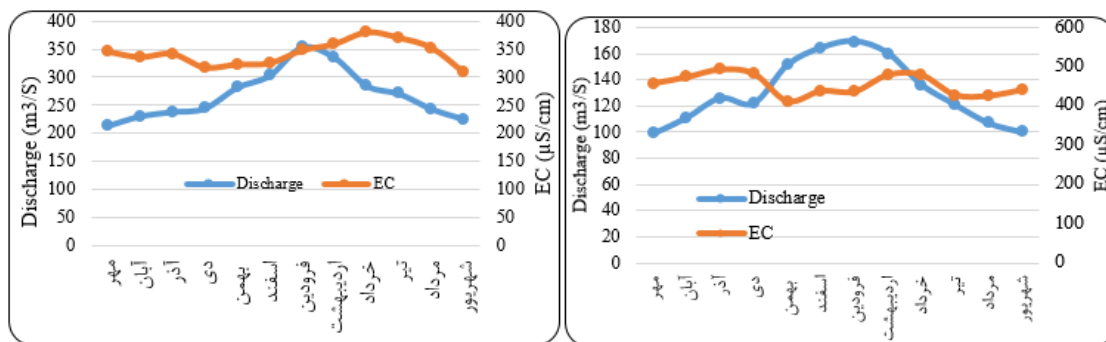
• صحت‌سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی محدوده تاقدیس گرین از داده‌های هدایت الکتریکی (EC) و دبی ماهانه طی دوره آماری ۱۵ ساله (۹۴-۱۳۸۰) چشمه‌های زز، آهنگران، نیاز و عبدالحسینی استفاده شده است. چشمه‌های زز و آهنگران در محدوده‌ای از تاقدیس گرین و در حوضه‌الشر 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 کاهش EC 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-

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. به عبارت دیگر 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 (شکل ۱۱).



شکل ۱۰. نمودار EC در برابر دبی ماهانه در چشمه‌های زز (راست) و آهنگران (چپ) در حوضه الشتر



شکل ۱۱. 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. به عبارت دیگر با توجه به فراهم بودن شرایط مناسب کارست‌زائی، از جمله سنگ‌شناسی، تکنونیک 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 محدوده 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 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 ۱۰٫۴ ارزش‌گذاری، طبقه‌بندی و همپوشانی گردیده و نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های مورد مطالعه تهیه شد. در مرحله نهایی به‌منظور صحت‌سنجی و راستی آزمایشی نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی، از داده‌های

هیدروشیمیایی چشمه‌های زز، آهنگران، نیاز و عبدالحسینی استفاده شد. برای این منظور هدایت الکتریکی (EC) ماهانه در برابر دبی ماهانه طی یک دوره آماری ۱۵ ساله 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) از جمله 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 بر گرفته 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 (از جمله 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 از جمله دولین‌ها، فروچاله‌ها، پولیه‌ها، منطبق بر نواحی با آسیب‌پذیری بالا می‌باشند. صحت‌سنجی نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری 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. از جمله 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

طریق دولین‌ها، پونورها، حفرات بلعنده و شافت‌ها به درون آبخوان‌های کارستی می‌تواند در حفظ کیفیت این منابع موثر باشد. تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌ها و تفکیک حدود آبرگیر 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): ۱-۱۶.
- رنگرن، کاظم؛ علی محرابی‌نژاد، فرشاد علیجانی و زهره استاد هاشمی. ۱۳۹۶. آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی جنوب شرق ایذه با استفاده از روش COP. *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 روش COP و PaPRIKa با استفاده از سنجش از دور و GIS. *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، عبدالله؛ مریم جعفری اقدم و علی جهانفر. ۱۳۹۳. ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با استفاده از مدل COP (مطالعه موردی: آبخوان کارستی گلین، 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. ۲۰۱۶. Groundwater Vulnerability Using DRASTIC and COP Models: Case Study of Halabja Saidu Basin, Iraq. *Journal of Engineering*, ۸: ۷۴۱-۷۶۰.
- Adams, B and S.S.D. Foster. ۱۹۹۲. Land-surface zoning for groundwater protection. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, Vol. ۶, Pp. ۳۱۲-۳۲۰.
- Afrasiabian, A. ۲۰۰۷. The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran, *Environ Geology*, ۵۲: ۶۷۳-۶۷۷.
- 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. Malekhamdi. ۲۰۱۸. Groundwater vulnerability assessment in karstic aquifers using COP method, Journal of Environmental Science and Pollution Research Basin. Xinjiang, Northwest China, *Environmental Earth Science*, ۶۰(۵): ۱۰۵۵-۱۰۶۳.
- 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 vulnerability of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography*, ۳۲: ۸۶۸-۸۷۷.
- Calic, J. ۲۰۱۱. Karstic uvula revisited: Toward a redefinition of the term, *Journal of Geomorphology*, ۱۳۴ (۱): ۴۲-۴۲.
- Civita M. ۱۹۹۴. Aquifer Vulnerability maps to pollution, Pitagora Ed., Bologna. Developing countries: A case study in northern Costa Rica. *Journal of Hydrology*, ۳۳۴: ۱۰۹-۱۲۴.

- 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): ۱۶۵-۱۷۶.
- Ford. D and P. Williams. ۲۰۰۷. Karst Hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons Ltd ۱-۵۶۲.
- 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*, ۱۶۱: 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 Ouyse karst system (southwest France). *Journal of Hydrogeology*, ۱۹ (۲): ۳۳۹-۳۵۳.
- 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*, ۶۵: ۲۴۰۷- ۲۴۲۱.
- Milanovic, P.; ۲۰۰۴. 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): ۲۶۳-۲۸۰.
- 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): ۱۰۵-۱۱۴.
- Raeisi, E. ۲۰۰۸. Groundwater storage calculation in karst aquifers with alluvium or No-flow boundaries. *Cave and karst science*, ۶۳(۳).
- Stigter, T.Y.; L. Ribeiro, and A. M. Carvalho Dill. ۲۰۰۶. 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*, ۱۴ :۷۹-۹۹.
- Vias, J. M.; B. Andreo, M. J. Perles, F. Carrasco, I. Vellido, and P. Jimenez. ۲۰۰۶. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method: Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*, ۱۴: ۹۱۲-۹۲۵.
- Waele, J.D.; L. Plan, and P. Audra, ۲۰۰۹. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction, *Geomorphology*, ۱۰۶: ۱-۸.