

## لزوم حفاظت کیفی و تعیین زون های حفاظتی منابع آب کارست در ایران

سعیده منبری<sup>۱\*</sup>، محسن فرزین<sup>۲</sup>، مجید خزایی<sup>۳</sup>

۱- (\* نویسنده مسئول) دانش آموخته کارشناسی ارشد محیط زیست و منابع طبیعی، مرکز تحقیقات بیابان، دانشگاه تهران

*menbari.saeideh@gmail.com*

۲- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج *m.farzin@ut.ac.ir*

۳- کارشناس پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد *khazayi64@gmail.com*

### چکیده

گسترش قابل توجه سازندهای کارستی به ویژه سازندهای کربناته در زون های زمین شناسی زاگرس، کپه داغ، البرز و به صورت محدود در نواحی مرکزی ایران، شرایط مناسبی در شکل گیری مخازن نسبتاً قابل توجه آب زیرزمینی کارستی را در کشور ایجاد کرده است. با افزایش روز افزون جمعیت و نیاز فزاینده به منابع آب، بهره برداری از منابع آب کارست رو به فزونی نهاده است. این بهره برداری بی رویه در بسیاری از نقاط، منجر به عدم تعادل در آبخوان های کارستی و خشکیدن چشمه ها شده است به طوری که این منابع، به احیا و مدیریت پایدار، نیاز مبرم دارند. ماهیت کارست به گونه ای است که همواره خطرپذیری زیادی را در ارتباط با هر گونه فعالیت انسانی که با آن سروکار داشته باشد را به دنبال دارد از این رو، حفاظت از چشم اندازهای کارستی یک منطقه می تواند از گسترش آلودگی جلوگیری کرده و به ویژه استفاده نامتعارف از منابع کارستی مثلاً آلودگی فروچاله های کارستی را کاهش دهد. نقشه آسیب پذیری به عنوان ابزاری برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان کارستی تهیه می شود و به عنوان پایه ای برای زون بندی حفاظتی و طرح ریزی کاربری اراضی پیشنهاد شده است. ریسک آلودگی آب زیرزمینی به نقشه آسیب پذیری بستگی دارد و در نتیجه استفاده از روش های ویژه برای تعیین آسیب پذیری، نتایج گویاتر و دقیق تری را ارائه می دهد. در واقع، تهیه نقشه آسیب پذیری یکی از روش هایی است که عمدتاً در پژوهش پیچیده هیدروژئولوژیکی به عنوان روشی افزوده برای مطالعات حفاظت آب زیرزمینی، برنامه های آمایشی یا پروژه های ارزیابی تاثیر و فشار، مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور تعیین آسیب پذیری و تهیه نقشه حساسیت به آلودگی آبخوان های کارستی، همواره تلاش شده است که روش و مدلی ویژه و منطبق با ویژگی های سیستم کارستی ارائه گردد که بدین منظور چندین روش ارائه شده است؛ خاستگاه این روش ها عموماً اروپا می باشد و اختلاف آنها بیشتر در نمره دهی و گاهی معیارهای انتخابی است. با توجه به گستردگی وسیع سازندهای کربناته و رخساره های کارستی در ایران و به ویژه در زون زاگرس و نیز مقدار بارش نسبتاً مشابه با برخی از کشورهای اروپایی، پیشنهاد می گردد که رویکرد اروپایی را به منظور تعیین آسیب پذیری آبخوان های کارستی در محدوده زاگرس مد نظر قرار داده و از روش های مبتنی بر آن از جمله COP، اسلوونی، KAVA، COP+K، آسیب پذیری و در نتیجه زون های حفاظتی لازم را تعیین کرد. در نهایت، می توان با مبنا قرار دادن رویکرد اروپایی، آسیب پذیری و زون های حفاظتی آبخوان های کارستی کشور را تعیین و با اعتبارسنجی و صحت سنجی، دیگر عوامل موثر در آسیب پذیری آبخوان کارستی از جمله وضعیت خطواره های کارستی مانند تعداد، تراکم و جهت خطواره ها، را نیز به مدل وارد کرد و در واقع، یک مدل جدید و منطقه ای مختص ایران معرفی و اجرا نمود.

واژه های کلیدی: منابع آب کارست، آسیب پذیری کارست، حفاظت کارست

## مقدمه

در بسیاری از نواحی، آب‌های زیرزمینی مهمترین و مطمئن‌ترین منابع آب شرب به حساب می‌آیند (زو و بالک<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸؛ بوکیانگ و فانهای<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱). طی دهه‌های اخیر استفاده از آب زیرزمینی به طور چشمگیری افزایش یافته است دلیل آن را می‌توان حضور گسترده، کیفیت خوب، قابلیت اتکا در طول خشکسالی‌ها و هزینه‌های ناچیز بهره‌برداری از آن دانست. صنعت و کشاورزی به طور گسترده‌ای به آب زیرزمینی وابسته هستند (منشینی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). به طور کلی، آب زیرزمینی سه نقش عمده را در محیط زیست ما بر عهده دارد (لرنر و هریس<sup>۴</sup>، ۲۰۰۹): I) ایجاد جریان پایه که بیشتر رودخانه‌ها در طول سال از آن برخوردارند، II) نگهداشت کیفیت خوب آب رودخانه با رقیق‌سازی فاضلاب‌ها و سایر جریان‌های آلوده III) منبع بسیار خوب تامین آب می‌باشد به طوری که در برخی از مناطق بیش از ۷۵ درصد از آب شرب را تامین می‌نماید. با این وجود، آلودگی و بیش‌برداری می‌تواند موجب تخریب کمیت و کیفیت قابل توجهی در منابع آب زیرزمینی شود. مدیریت بهینه و حفاظت از این منابع حیاتی برای نسل‌های آینده ضروری است. به منظور حفاظت از این منابع مهم، تعیین نواحی ایمن برای آب شرب، ابزار بسیار مهم تلقی می‌گردد (منشینی و همکاران، ۲۰۱۵).

ارائه نقشه حساسیت و آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی، تصویر شفافی از وضعیت پتانسیل منابع آب زیرزمینی ارائه می‌دهد که طبق آن، هر تصمیم مدیریتی که اثرات زیست محیطی آن به صورت مستقیم یا غیر مستقیم متوجه این منابع مهم آبی کشور می‌شود، با آگاهی اتخاذ خواهد شد و همچنین ضرورت اعمال شیوه‌های مدیریت منابع آب در هر نقطه مشخص می‌گردد. به عبارت دیگر، ریسک آلودگی آب زیرزمینی به شدت به نقشه آسیب‌پذیری وابسته است (کازاکیس<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۵).

منابع آب کارست برای هزاران سال دارای اهمیت بوده است. چشمه‌های کارستی اهمیتی بیشتری نسبت به سایر اشکال کارستی داشته است به طوری که در همه مناطق کارستی، بسیاری از ابتدایی‌ترین روستاها و شهرها در مجاورت آنها متمرکز بوده‌اند. جمعیت شهری و روستایی زیادی به شدت به منابع آب کارستی وابسته است. برای مثال، اراضی کربناته اروپا، حدود ۳۵ درصد از سطح قاره اروپا را به خود اختصاص داده است و شهرهای خیلی مهمی به طور کامل یا نسبی با آب‌های کارستی تامین می‌شوند از جمله بریستول، لندن، پاریس، رم و وین. در برخی از کشورهای اروپایی، آب کارست ۵۰ درصد از کل آب آشامیدنی را تامین می‌کند و در بسیاری از مناطق، تنها منبع آب شیرین در دسترس است. ۴۰ درصد از ناحیه شرق رودخانه می‌سی‌سی‌پی ایالات متحده آمریکا تحت تاثیر سفره کارستی قرار گرفته است. تنها در جنوب چین، بیش از ۱۰۰ میلیون نفر بر روی کارست زندگی می‌کنند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷)؛ همچنین بیش از ۲۰ درصد از سطح ایالات متحده آمریکا توسط سنگ‌های کربناته اشغال شده است به طوری که حدود یک سوم از آب شرب آن کشور از سفره‌های کارستی تامین می‌شود (دیویس و همکاران، ۲۰۰۲).

با افزایش روز افزون جمعیت و نیاز فزاینده به منابع آب، بهره‌برداری از منابع آب کارست رو به فزونی نهاده است. این بهره‌برداری بی‌رویه در بسیاری از نقاط، منجر به عدم تعادل در آبخوان‌های کارستی و خشکیدن چشمه‌ها شده است. هر چه سطح آب‌های زیرزمینی دشت‌های پایین دست آبخوان‌های کارستی کاهش یابد خطر تعمیق چاه‌ها و بهره‌برداری غیرمتعارف از آب‌های کارستی افزایش می‌یابد. آلودگی آب‌های زیرزمینی و اثرات آن بر جوامع بشری امری ناگوار و در عین حال معضلی به شدت تهدیدکننده است چراکه هنوز در بسیاری از جوامع، رفتاری که مبتنی بر رعایت محیط زیست (و در نگاه ویژه آن، آب و منابع تامین آن) باشد تکوین نیافته و آموزش عمومی نتوانسته است بر آسان‌نگری عمومی مردم فائق آید، نمونه‌های بسیاری از آلودگی آب چشمه‌ها، به علت دفن پسماندها، زباله‌های شهری و مواد شیمیایی در داخل چاله‌های کارستی دنیا گزارش شده‌اند. بدون شک حفاظت از چشم اندازهای کارستی یک منطقه می‌تواند درک عمومی برای پرهیز از گسترش آلودگی و به ویژه استفاده نامتعارف از منابع کارستی مثلاً آلودگی فروچاله‌های کارستی را کاهش دهد (طاهری و رئیس، ۱۳۸۹).

1 Zhu and Balke  
2 Baoxiang and Fanhai  
3 Menichini  
4 Lerner and Harris  
5 Kazakis

## آسیب پذیری آبخوان

یکی از عوامل اصلی برای تعیین حریم کیفی در سطح یک آبخوان یا گروهی از آبخوان‌ها، شاخص آسیب پذیری می‌باشد. اهمیت آسیب پذیری زمانی بیشتر می‌شود که به زمان و هزینه گزافی که برای پایش و بررسی آلودگی چاه‌های یک منطقه در ابعاد گسترده صرف می‌شود، توجه گردد. به طور کلی آسیب پذیری از نظر مفهوم به دو دسته ذاتی و ویژه تقسیم می‌گردد:

- آسیب پذیری ذاتی: این نوع آسیب پذیری به ویژگی‌های آبخوان، هدایت هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و خلل و فرج و تنش‌های وارده به سیستم از جمله تغذیه، واکنش با آب سطحی، زمان حرکت از میان منطقه اشباع و دبی پمپاژ بستگی دارد و به عبارت دیگر آسیب پذیری ذاتی به ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژیکی یک منطقه بستگی دارد و منابع آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی یا طبیعی را نادیده می‌گیرد.
- آسیب پذیری ویژه: این نوع آسیب پذیری نشان‌دهنده حساسیت آب‌های زیرزمینی به آلاینده‌ای خاص یا گروهی از آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد. به عبارت دیگر، آسیب پذیری ویژه، از واکنش آلاینده‌ها با اجزای مختلف آسیب پذیری ذاتی، به وجود می‌آیند. به عنوان مثال، اگر آبخوان از نوع کربناته باشد، با توجه به نوع فعالیت‌های انسانی و نوع مواد شیمیایی خاصی که استفاده می‌گردد، از واکنش بین آن‌ها یک نوع حساسیت به آلودگی خاص برای سفره ایجاد می‌گردد. به طور کلی، آسیب پذیری آب زیرزمینی به آلودگی، حساسیت ذاتی، موقعیت و نوع منابع آلاینده بستگی دارد.

## عوامل موثر بر آسیب پذیری آبخوان

ضخامت و خصوصیات هیدرولیکی سازندهای زمین‌شناسی زون غیراشباع از عوامل کلیدی تعیین آسیب پذیری سفره‌های آب زیرزمینی بوده و کنترل کننده‌های اصلی و طبیعی نرخ تغذیه و مدت زمان تغذیه آبخوان می‌باشند. منطقه غیر اشباع با نگهداشت، جذب و حذف ویروس‌های بیماری‌زا و باکتری‌ها، جذب و کاهش بسیاری از مواد شیمیایی آلی مصنوعی، رقیق کردن غلظت فلزات سنگین و مواد شیمیایی غیرآلی دیگر از طریق جذب و واکنش با سطح کانی‌ها در منطقه غیر اشباع و از طریق گیاهان و محصولات کشاورزی نقش کلیدی در حفاظت از آب زیرزمینی ایفا می‌کند. بیش‌ترین کاهش و زوال مواد شیمیایی مصنوعی مانند سموم و حلال‌ها در لایه خاک (بالاترین بخش منطقه غیراشباع) صورت می‌گیرد. لایه خاک معمولاً با ضخامت حدود نیم تا دو متر از سطح زمین به لحاظ میکروبیولوژی منطقه بسیار فعالی به شمار می‌رود. فعالیت نسبتاً بالای میکروبی، وجود مواد آلی بالا و وجود ریشه گیاهان، ظرفیت حذف و کاهش قابل توجهی را در خاک نسبت به بخش‌های زیرین منطقه اشباع فراهم می‌کند. پتانسیل خاک و منطقه غیراشباع برای جذب، کاهش و یا حذف مواد، بستگی به نوع آلاینده نیز دارد، از این رو در مطالعه‌های آسیب پذیری که ویژه یک نوع کاربری با آلاینده خاص می‌باشد، مورد بحث قرار می‌گیرد.

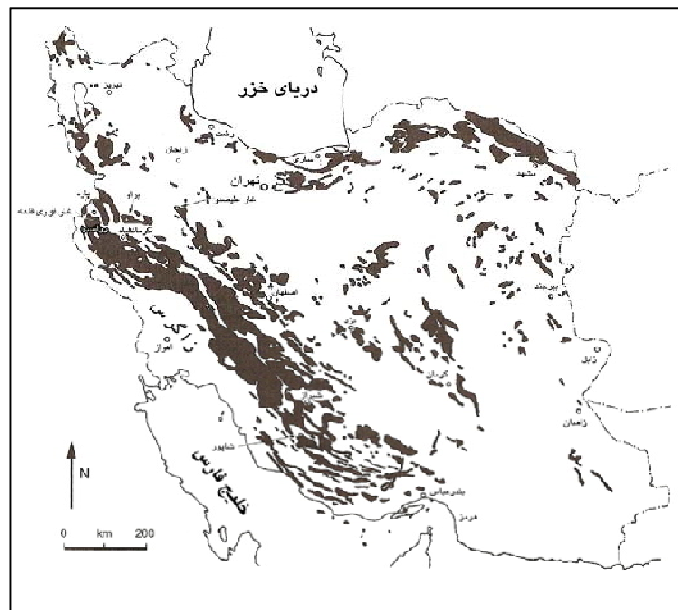
میزان تغذیه که در سطح زمین رخ می‌دهد، یکی دیگر از عوامل مهمی است که بر آسیب پذیری آبخوان تأثیر می‌گذارد. به طور کلی آسیب پذیری با میزان تغذیه رابطه مستقیم دارد. هر چقدر میزان تغذیه بیش‌تر باشد آسیب پذیری نیز بیش‌تر خواهد بود. اگر شرایط آب و هوایی طوری است که تغذیه بسیار کم بوده و یا اصلاً صورت نمی‌گیرد، حرکت رو به پایین آب از طریق منطقه غیر اشباع، بدون توجه به خصوصیات هیدرولیکی منطقه غیر اشباع، بسیار کم خواهد بود.

شیب زیاد منجر به افزایش رواناب به زهکش‌ها و رودخانه‌ها می‌شود، به ویژه اگر نفوذپذیری کم‌تر باشد ظرفیت نفوذ پایین خواهد بود. از طرف دیگر، در خاک‌هایی با نفوذپذیری بالا، بدون توجه به شیب سطح زمین، آب فرصت کم‌تری برای ایجاد رواناب خواهد داشت. پارامتر زمان نیز بخش مهمی از تعریف ارزیابی آسیب پذیری است که به عوامل مختلف بستگی دارد. معمولاً اگر یک آلاینده، زمان زیادی برای رسیدن به آب زیرزمینی صرف کند یا اگر آلاینده به دلیل هدایت هیدرولیکی پایین یا سرعت کم آب زیرزمینی، در داخل آبخوان به کندی حرکت کند آسیب پذیری آب زیرزمینی پایین خواهد بود و برعکس. مکانیزم تغذیه آب زیرزمینی و ظرفیت میرایی آلاینده‌ها در پروفیل خاک زیرسطحی شدیداً با شرایط زمین‌شناسی نزدیک به سطح زمین متغیر می‌باشد. از این رو، به منظور حفاظت بیش‌تر آبخوان‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی می‌توان میزان ظرفیت میرایی سفره که در آسیب پذیری نهفته است را تعیین نمود.

## آبخوان کارستی

اصطلاح کارست برای توصیف نوع ویژه‌ای از چشم انداز در برگزیده غارها و سیستم‌های آبی زیرزمینی گسترده‌ای استفاده می‌شود که به طور ویژه در سنگ‌های انحلال‌پذیر نظیر سنگ آهک، مرمر و گچ توسعه می‌یابد. سفره‌های آب زیرزمینی کارستی در حقیقت، مخازن زیرزمینی ناهمگونی هستند که آب در شبکه شکاف‌ها، غارها و کانال‌های متصل به هم جمع‌آوری می‌شود. سطح آزاد آب آبخوان هم یک سطح پیوسته و کاملا تعریف شده نیست و تابعی از شیب‌های محلی است. به طور کلی باید گفت که تمام شیب سفره به سمت سطح اساس فرسایش است، یعنی جایی که آب در آن تحت تاثیر این سطح اساس زهکش قرار می‌گیرد. موقعیت مکانی سطح اساس فرسایش یک عامل اصلی در تعیین مسیر اصلی گردش آب زیرزمینی محسوب می‌شود. هیدرولوژی گسل‌ها و دیگر ویژگی‌های زمین‌شناسی نیز عوامل بسیار مهمی در تعیین جهت یا کنترل جریان آب زیرزمینی است اما عملکرد آنها اساسا اهمیت کمتری نسبت به نقش سطح اساس فرسایش دارد (میلانوویچ، ۲۰۰۰): به طور کلی، ابعاد بزرگ مجاری کارستی، ارتباط خوب بین آنها، شیب‌های تند سطح آب و قابلیت نفوذ بالای زون‌های سطحی، امکان پرشدن و تخلیه سریع این محل‌های تجمع آب یا به عبارت بهتر تشکیل سریع آبخوان‌ها و تقریبا به همین نسبت زهکش سریع آنها را میسر می‌سازد.

نواحی وسیعی از ناحیه قاره‌ای بدون یخ کره زمین تحت سیطره کارست توسعه یافته در سنگ‌های کربناته قرار دارد و تقریبا ۲۵-۲۰ درصد از جمعیت جهان عمدتا یا کاملا به آب زیرزمینی مستخرج از آنها وابسته‌اند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). این منابع تحت فشار افزاینده‌ای قرار دارند و به احیا و مدیریت پایدار، نیاز مبرم دارند. برای مثال، اراضی کربناته اروپا، حدود ۳۵ درصد از سطح را به خود اختصاص داده است و آب مصرفی شهرهای خیلی مهمی به طور کامل یا نسبی با آب‌های کارستی تامین می‌شوند از جمله بریستول، لندن، پاریس، رم و وین. در برخی از کشورهای اروپایی، آب کارست ۵۰ درصد از کل آب آشامیدنی را تامین می‌کند و در بسیاری از مناطق، تنها منبع آب شیرین در دسترس است. ۴۰ درصد از ناحیه شرق رودخانه می‌سی‌سی‌پی ایالات متحده آمریکا تحت تاثیر آبخوان کارستی قرار گرفته است. تنها در جنوب چین، بیش از ۱۰۰ میلیون نفر بر روی کارست زندگی می‌کنند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷)؛ همچنین بیش از ۲۰ درصد از سطح ایالات متحده آمریکا توسط سنگ‌های کربناته اشغال شده است به طوری که حدود یک سوم از آب شرب آن کشور از آبخوان‌های کارستی تامین می‌شود (دیویس و همکاران، ۲۰۰۲).



شکل ۱- پراکندگی سازندهای کارستی در ایران (سازمان زمین‌شناسی کشور)

گسترش قابل توجه سازندهای کارستی به ویژه سازندهای کربناته در زونهای زمین‌شناسی زاگرس، کپه داغ، البرز و به صورت محدود در نواحی مرکزی ایران، شرایط مناسبی در شکل‌گیری مخازن نسبتاً قابل توجه از آب زیرزمینی کارستی را در کشور ایجاد کرده است. سازندهای کربناته (شکل ۱) معروفی مانند سازند کربناته آسماری، جهرم، شهبازان، تارپور و سروک در زون زمین‌شناسی زاگرس، سازندهای مزدوران و تیرگان در زون کپه داغ، سازندهای لار و الیکا و سنگ‌های آهکی کرتاسه در زون البرز و برونزد قابل توجه سنگهای کربناته کرتاسه در ایران مرکزی شرایط مساعدی را جهت شکل‌گیری مخازن مهم آب زیرزمینی کارستی فراهم نموده است به طوری که هم اکنون آب شرب بسیاری از شهرهای کوچک و بزرگ کشورمان را تامین میکند. حدود ۱۱ درصد از کشور را سازندهای کربناته به خود اختصاص می‌دهند توزیع این سنگ‌ها در کشور یکنواخت نمی‌باشد و بیشترین گسترش سنگ‌های کربناته به زون زاگرس اختصاص دارد به طوری که بیش از ۵۵ درصد از سازندهای کربناته کارستی ایران را در برمی‌گیرد (رئیس‌ی، ۲۰۰۲).

### چالش‌های منابع آب کارست در ایران

بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان‌های کارستی در بسیاری از مناطق ایران منجر به عدم تعادل در آبخوان‌های کارستی و خشکیدن چشمه‌ها شده است. این مهم اکنون در بسیاری از دشت‌های ایران، موجب کاهش کیفیت یا تنزل حجم مخازن کارست شده است. ضمن اینکه در برخی مناطق عمق فاجعه با ایجاد فروچاله‌های کارستی مشخص شده است؛ نمونه بارز آن را می‌توان در فروچاله‌های کارستی دشت فامنین و کبودرآهنگ استان همدان مثال زد (طاهری ۱۳۸۴). احداث ساختمان‌های مسکونی بر روی سازندهای کارستی نیز منجر به آلودگی آب‌های کارستی شده است. برای مثال در دامنه کوه باباکوهی شیراز، به طور وسیعی منازل مسکونی بر روی سازند کارستی احداث شده است و در پایین دست، چاه‌های شرب شیراز قرار دارند. نمونه دیگر، رها نمودن لاشه گوسفندان و سایر احشام تلف شده بر روی سازندهای کارستی مرتفع یا در داخل فروچاله‌ها است. در ایران ۱۲۰ گنبد نمکی وجود دارد که بسیاری از آنها باعث شور شدن آب‌های کارستی مجاور شده‌اند به طوری که حتی نمی‌توان آب‌های کارستی را برای کشاورزی مورد استفاده قرار داد. برای جلوگیری از نفوذ آب شور گنبد نمکی به داخل سازند کارستی، به شناخت گنبد نمکی از جنبه‌های مختلف نیاز است (طاهری و رئیس‌ی، ۱۳۸۹). تخریب و آلودگی منابع کارست در ایران رو به افزایش است و بنابراین انجام تحقیقات و ارائه برنامه اجرایی برای حفاظت از منابع کارستی را باید جدی تلقی نمود.

### حساسیت و آلودگی آبخوان‌های کارستی

ماهیت کارست به گونه‌ای است که همواره خطرپذیری زیادی را در ارتباط با هر گونه فعالیت انسانی که با آن سروکار داشته باشد را به دنبال دارد. آبخوان کارستی و سفره آب زیرزمینی محیط‌های درز و شکاف‌دار بر خلاف آبخوان محیط‌های متخلخل، خودپالایی بسیار کمی دارند؛ به عبارت دیگر هر گونه آلودگی در سفره آب زیرزمینی کارستی سریعاً گسترش می‌یابد. در واقع، شرایط ویژه هیدرودینامیکی حاکم بر آبخوان‌های کارستی سبب ایجاد تفاوت شدید بین این آبخوان‌ها و آبخوان‌های آبرفتی شده است. بالا بودن قابلیت هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال و ناهمگنی و ناهمگنی شدید آبخوان‌های کارستی، آسیب‌پذیری آنها را در مقابل آلاینده‌ها (فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی) افزایش می‌دهد به طوری که ممکن است در زمانی اندک، حجم قابل توجهی از منابع آب اینگونه آبخوان‌ها در خطر آلودگی قرار گیرد. به طوری که گاهی مواقع، آبخوان کارستی در ازای بارش‌های بسیار تند (اغلب بالای ۳۰ میلی‌متر) در فصل بارش، در فاصله زمانی بین ۱۰ تا ۱۵ ساعت واکنش نشان می‌دهد که حتی در بعضی موارد کمتر از این زمان نیز به وقوع می‌پیوندد؛ طی فصل مرطوب زمستان، واکنش آبخوان به بارندگی به صورت کاملاً واضح نمایان می‌شود؛ به طوری که با بارش زیاد باران، واکنش سطح آب زیرزمینی در کمتر از ۴ ساعت را به همراه دارد که موجب افزایش بسیار سریع سطح آب زیرزمینی می‌شود (میلانوویچ، ۲۰۰۰).

در محیط متخلخل، انتقال باکتریایی با جذب باکتری‌ها به ماتریکس رسوب کاهش می‌یابد. در حالی که در آبخوان‌های کارستی، رسوب

متحرک بوده و از این رو می‌تواند به عنوان وسیله‌ای برای حمل و انتقال آلودگی‌های جذب شده از جمله باکتری‌ها عمل نماید. بعلاوه، آبخوان‌های کارستی سایر ویژگی‌هایی را که ارتباط زیادی به بررسی آلودگی باکتریایی دارد را نشان می‌دهند: اول، به طور غالب در آبخوان‌های کارستی ارتباط مستقیم و سریعی بین آب سطحی و آب زیرزمینی برقرار است. دوم، کارست بسیار ناهمگن است؛ چاه‌های حفره شده در آن ممکن است تنها در فاصله چند متری رفتار هیدروژئولوژیکی بسیار متفاوتی را بروز دهند که نشان می‌دهد چاه‌ها می‌توانند درجه مختلفی از آسیب‌پذیری و حساسیت به آلودگی میکروبیولوژیک داشته باشند. سوم، کیفیت آب در کارست می‌تواند به طور قابل توجهی طی دوره‌های زمانی کوتاه تغییر کند؛ ممکن است نمونه‌برداری فصلی، هفتگی یا حتی روزانه برای توصیف وقایع آلودگی کافی نباشد (ساسوسکی و مایلروی، ۲۰۰۷).

جریان آب در مجاری زیرزمینی مهمترین نوع حرکت آب در کارست است و به شکل جریان‌های متمرکز در طول مسیرهای متمایز جریان‌های زیرزمینی رخ می‌دهد. چون تخلخل کل پهنه‌های کارستی نسبتاً کم است و بین ۰/۷ تا ۳ درصد تغییر می‌کند و ممکن است به طور موضعی بیشتر هم باشد، اگر این تخلخل در هر متر مکعب توده سنگ به طور یکنواخت توزیع شود، حرکت آب در سیستم کارست عملاً غیر ممکن خواهد بود. به هر جهت، بررسی‌های اخیر به وضوح آشکار نموده است که حرکت خیلی سریع آب در کارست با کمیت‌های قابل ملاحظه و با عبور از این سیستم اتفاق می‌افتد و به این نتیجه می‌رسیم که آب از طریق مجاری با ابعاد بزرگ جریان پیدا می‌نماید (آغاسی و افراسیابیان، ۱۳۷۸). سرعت حرکت آب در آبخوان کارستی، علاوه بر وضعیت زمین ساخت (درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی، چین‌ها، گسل‌ها، شکستگی‌ها) و ژئومرفولوژیک، با شرایط هیدرولوژیک منطقه نیز متناسب است؛ به طوری که در فصل خشک که سطح سفره آب زیرزمینی پایین است، حرکت آب در سیستم کارستیک آرام می‌باشد و برعکس در زمستان که تراز آب و حجم ورودی بالا است، جریان آب در آبخوان بسیار سریع خواهد بود.

### برآورد آسیب‌پذیری و تعیین زون‌های حفاظتی آبخوان‌های کارستی

نقشه آسیب‌پذیری به عنوان ابزاری برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی تهیه می‌شود و به عنوان پایه‌ای برای زون‌بندی حفاظتی و طرح‌ریزی کاربری اراضی پیشنهاد شده است. در واقع، تهیه نقشه آسیب‌پذیری یکی از روش‌هایی است که عمدتاً در پژوهش پیچیده هیدروژئولوژیکی به عنوان روشی افزوده برای مطالعات حفاظت آب زیرزمینی، برنامه‌های آمایشی یا پروژه‌های ارزیابی تاثیر و فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو نوع نقشه آسیب‌پذیری بنیادی تهیه می‌شود: تهیه نقشه آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه. طی ۱۵ سال گذشته، روش‌های آسیب‌پذیری زیادی توسعه یافته‌اند با این وجود فقط تعداد کمی از آنها برای تحلیل آسیب‌پذیری سفره‌های کارستی مناسب هستند و تنها برخی از آنها برای انواع ویژه‌ای از اراضی کارستی استفاده شده‌اند. در این میان، کشورهای اروپایی به دلیل برخورداری بیشتر از منابع آب کارست، توجه مضاعفی به تعیین آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی خود معطوف داشته‌اند. به طوری که حرکت به سوی توسعه یک رویکرد بهبود یافته برای مدیریت کیفیت آب زیرزمینی در اروپا توسط برنامه مشارکت علم و فناوری (COST<sup>1</sup>) محقق گردید. نخستین نوآوری‌های مربوط به کارست، COST Action 65 (۱۹۹۵) بود که با جنبه‌های هیدروژئولوژیکی حفاظت آب زیرزمینی در سنگهای کربناته سروکار داشت که پس از آن تا COST Action 620 (۲۰۰۴) ادامه یافت که ابزار توسعه یک رویکرد بهبود یافته و دائمی به منظور حفاظت آب‌های زیرزمینی کارست بود. این کارگروه، متخصصین کارست در هیدروژئولوژی، ژئومرفولوژی، شیمی محیط زیست و میکروبیولوژی را با هم جمع کرد و رویکردهای استفاده شده در ۱۵ کشور اروپایی شرکت کننده را مورد بررسی قرار داد. به منظور تعیین آسیب‌پذیری و تهیه نقشه حساسیت به آلودگی آبخوان‌های کارستی، همواره تلاش شده است که روش و مدلی ویژه و منطبق با ویژگی‌های سیستم کارستی ارائه گردد که بدین منظور چندین روش ارائه شده است؛ خاستگاه این روش‌ها عموماً اروپا می‌باشد و اختلاف آنها بیشتر در نمره‌دهی و گاهی معیارهای انتخابی است (جدول ۲). ریسک آلودگی آب زیرزمینی به نقشه آسیب‌پذیری بستگی دارد و در نتیجه استفاده از روش‌های ویژه برای تعیین آسیب‌پذیری، نتایج گویاتر و دقیق‌تری را ارائه می‌دهد (کزاکیس و همکاران، ۲۰۱۵).

1 Sasowsky and Mylroie

2 Cooperation in Science and Technology



جدول ۱- خلاصه ویژگی روش‌های ارائه شده برای تعیین آسیب پذیری آبخوان کارستی

نام مدل	عوامل مورد بررسی	چگونگی تعیین آسیب پذیری	معایب	مزایا
میلانوویچ (۲۰۰۰)	<ul style="list-style-type: none"> <li>زمان ایستایی یا سکون آب زیرزمینی</li> <li>فاصله منبع آلودگی و محل برداشت آب</li> </ul>	<p>با توجه به این دو عامل که خود از وضعیت زمین‌ساختی، هیدروژئولوژیک و هیدرولوژیک منطقه ناشی می‌شود، می‌توان حریم نواحی برداشت آب زیرزمینی در نواحی کارست را تعیین کرده و زون‌های حفاظتی ویژه‌ای برای آن مشخص کرد.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>زمان بر</li> <li>پر هزینه</li> <li>نادیده گرفتن عامل بارش</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>دقت زیاد</li> <li>محدوده زون‌های حفاظتی را مشخص می‌کند</li> </ul>
آیین‌نامه عمومی حفاظت کیفی منابع آب کارست در ایران	شدت آسیب پذیری	بدون ذکر عامل معین و روش تعیین آسیب‌پذیری، ناحیه حفاظتی را مشخص می‌کند	غیر قابل استناد	-
EPIK	<ul style="list-style-type: none"> <li>ابی کارست</li> <li>لایه پوششی محافظ</li> <li>شرایط نفوذ</li> <li>توسعه شبکه کارستی</li> </ul>	هر کدام از عوامل به چند کلاس تقسیم می‌گردد و نقشه‌های هر معیار بر اساس رابطه‌ای همپوشانی می‌شوند تا نقشه آسیب‌پذیری آبخوان کارستی حاصل گردد	<ul style="list-style-type: none"> <li>نادیده گرفتن جنس مواد زمین‌شناسی</li> <li>عدم بررسی وضعیت توپوگرافی</li> <li>نادیده گرفتن عامل بارش</li> <li>اعمال نظر کارشناسی</li> </ul>	سادگی
RISKE	<ul style="list-style-type: none"> <li>سنگ آبخوان</li> <li>نفوذپذیری خاک</li> <li>توسعه شبکه کارست</li> <li>ابی کارست</li> </ul>	اساسا بر مبنای روش EPIK بوده و در واقع به روز شده آن است	<ul style="list-style-type: none"> <li>نادیده گرفتن جنس مواد زمین‌شناسی</li> <li>عدم بررسی وضعیت توپوگرافی</li> <li>نادیده گرفتن عامل بارش</li> <li>اعمال نظر کارشناسی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>سادگی</li> <li>بررسی وضعیت سنگ آبخوان</li> </ul>
KARSTIC	<ul style="list-style-type: none"> <li>سینک‌هول‌های کارستی</li> <li>محیط سفره</li> <li>نرخ تغذیه</li> <li>محیط خاک</li> <li>توپوگرافی</li> <li>اثر زون غیر اشباع</li> <li>هدایت (هیدرولیکی) سفره</li> </ul>	اصلاح شده روش DRASTIC سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده است به طوری که هر کدام از عوامل بر مبنای درجه‌ای که آن عامل بر حساسیت آلودگی در ناحیه مشخصی تاثیر دارد، تعیین می‌شود. سپس، یک فرمول ریاضی، شاخص آلودگی پتانسیل را برای آن ناحیه ارائه می‌نماید.	<ul style="list-style-type: none"> <li>مبنای آن محیط‌های آبرفتی بوده و نمره‌دهی جداول آن مشابه با روش DRASTIC است</li> <li>عدم اعمال مستقیم اثر عامل بارش</li> <li>عدم توجه جدی به تشریح وضعیت کارست منطقه</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>اعمال مناسب ویژگی‌های هیدروژئولوژی</li> <li>برای سفره‌های غیر کارستی نیز قابل استفاده است</li> </ul>
PaPRIKa	<ul style="list-style-type: none"> <li>محافظت مخزن</li> <li>نفوذپذیری</li> <li>نوع کارست شدگی</li> </ul>	جدید و بهبود یافته تعیین نقشه آسیب‌پذیری ذاتی از روش‌های قبلی به ویژه روش‌های مختص سفره‌های کارستی مشتق شده است. روش پاپریکا به طور سیستماتیک دو نقشه آسیب‌پذیری ارائه می‌کند: نقشه آسیب‌پذیری منبع و نقشه آسیب‌پذیری حوضه آبخیز منشا	<ul style="list-style-type: none"> <li>در نظر نگرفتن اثر عامل بارش</li> <li>اعمال نظر کارشناسی</li> <li>دشواری در تعیین مقدار عامل Ka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ارائه نقشه آسیب‌پذیری منبع و حوزه آبخیز</li> </ul>
PI	<ul style="list-style-type: none"> <li>پوشش محافظ</li> <li>وضعیت نفوذپذیری</li> </ul>	COST 620 این روش را به عنوان امکانی جهت تعیین آسیب‌پذیری مخزن پیشنهاد داد البته به شرط آنکه داده‌های تفصیلی در دسترس باشند. این روش برای انواع سفره‌ها قابلیت کاربرد دارد و برای کارست نیز متدولوژی ویژه‌ای را ارائه می‌کند	<ul style="list-style-type: none"> <li>نیاز به داده‌های زیاد</li> <li>عدم توجه به عامل بارش</li> <li>دقت کم</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>قابلیت کاربرد برای انواع سفره</li> </ul>

نام مدل	عوامل مورد بررسی	چگونگی تعیین آسیب پذیری	معایب	مزایا
COP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تمرکز جریان</li> <li>- لایه های پوششی</li> <li>- بارش</li> </ul>	<p>بر اساس رویکرد اروپایی ارائه گردید. آسیب پذیری در این روش به صورت حاصلضرب سه فاکتور برآورد می شود. از آنجایی که این روش برای حفاظت مخزن ایجاد شده است عامل توسعه شبکه کارست سفره در نظر گرفته نمی شود.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ابهام در تاثیر ضخامت سازندهای آهکی در نمره عامل O</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- در نظر گرفتن ویژگی ها و ناهموزاری های کارستیک</li> <li>- قابلیت کاربرد در شرایط اقلیمی مختلف و انواع متفاوت سفره های کربناته</li> <li>- سادگی و دقت مناسب</li> </ul>
اسلوونی	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تمرکز جریان</li> <li>- لایه های پوششی</li> <li>- بارش</li> <li>- توسعه شبکه کارست</li> </ul>	<p>نسبتا بر اساس روش COP اسپانیایی است که تفسیر کاملی از رویکرد اروپایی ارائه می کند. نقشه آسیب پذیری ذاتی با ادغام فاکتورهای P و C، O حاصل می شود در حالی که نقشه آسیب پذیری منبع با تحمیل فاکتور K بر نقشه آسیب پذیری مخزن بدست می آید.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- دشواری تهیه نقشه توسعه شبکه کارست</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ارزیابی آسیب پذیری مخزن و منبع</li> </ul>
COP+K	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تمرکز جریان</li> <li>- لایه های پوششی</li> <li>- بارش</li> <li>- شبکه کارست</li> </ul>	<p>به روز شده روش COP است. با این روش می توان آسیب پذیری منبع آب را نیز ارزیابی کرد. تفاوت اساسی این روش با روش اسلوونی در نمره دهی، کلاس بندی و وزن دهی پارامترهای مجزا می باشد که خود مهمترین نقش را در ارزیابی درجه آسیب پذیری ایفا می کند.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- دشواری تهیه نقشه توسعه شبکه کارست</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ارزیابی آسیب پذیری مخزن و منبع</li> </ul>
KAVA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- حفاظت پوششی</li> <li>- تاثیر بارش</li> <li>- وضعیت نفوذ پذیری</li> <li>- وضعیت سفره</li> </ul>	<p>بر خلاف رویکرد اروپایی و سایر روش های موجود برای ارزیابی آسیب پذیری ذاتی، در روش KAVA بخش غیراشباع و اشباع سفره های کارستی با هم در نظر گرفته میشوند. شاخص آسیب پذیری از مجموع سه عامل ضربدر در عامل بارش محاسبه می شود.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- دشواری تعیین وضعیت سفره های کارستی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ارزیابی آسیب پذیری مخزن و منبع</li> <li>- بررسی همزمان وضعیت استاتیک و دینامیک سیستم کارست</li> </ul>
لویبیزکی و همکاران (۲۰۱۵)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- میزان بارندگی</li> <li>- وضعیت توپوگرافی</li> <li>- وضعیت سنگ درز و شکافدار</li> <li>- وضعیت محیط متخلخل</li> </ul>	<p>بخش های کمی روش های موجود را با خصوصیات سنگ های درز و شکافدار تلفیق می کند و اولین روش ارزیابی منطقه ای است که آسیب پذیری سازندهای درز و شکافدار یا سفره سنگ درز و شکافداری که توسط مدل های محیط متخلخل یا زمین شناسی کارست قادر به تفسیر نیست را تعیین می نماید. شاخص آسیب پذیری نهایی از طریق رابطه ای با مجموع عوامل تعیین می شود و برای ساده سازی به پنج طبقه درجه بندی می شود.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- بیشتر بر سازندهای سخت و درز و شکافدار تاکید دارد که میتواند در سازندهای کربناته و مناطق کارستیک صادق نباشد</li> <li>- دشواری تعیین ترانس میسیویوتی در آبخوان های کارستی</li> <li>- دشواری تعیین هدایت هیدرولیکی آبخوان</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ارزیابی آسیب پذیری آبخوان در محیط آبرفتی و درز و شکافدار با پارامترهای محدود و کاربردی</li> </ul>

### نتیجه گیری

به منظور حفاظت از منابع آب کارست در مقابل آلودگی، اعمال محدودیت ها بر منابع آلاینده ورودی، کاربری اراضی و همچنین برداشت بی رویه از منابع آب ضروری است. عدم رعایت حریم ها در استفاده از منابع آب زیرزمینی در ایران چنان گسترده است که به موجب آن به طور متوسط هر سال سطح آب های زیرزمینی در ایران نیم متر از سال قبل پایین تر رفته است و بسیاری از منابع دیگر



نیز آلوده شده‌اند؛ اما در این بین محدودیت‌هایی نیز وجود دارد چرا که از دیدگاه اقتصادی- اجتماعی نمی‌توان برای حفاظت کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، کل محدوده را برای کاربری‌های مختلف ممنوع کرد؛ بنابراین بسیار مقرون به صرفه و معقول خواهد بود که به جای اعمال ممنوعیت مطلق بر ورود منابع آلاینده در محدوده آبخوان، نوع کاربری اراضی و میزان برداشت در هنگام تعریف و تعیین حداقل سطح کنترل ایمن در حفاظت کیفی منابع آب، از ظرفیت میرایی طبیعی آلاینده (خود پالایی آلاینده) در مسیر جریان استفاده شود و در نتیجه به جای ممنوعیت مطلق بر تمامی قسمت‌ها، تنها ورود آلاینده‌ها و توسعه کاربری، برای مناطق حساس و مستعد آلودگی ممنوع گردد و برای دیگر مناطق با توجه به شرایط فیزیکی و میزان پتانسیل آلودگی آن‌ها، محدودیت‌های متناسب اعمال گردد. پهنه‌بندی کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی اولین مرحله در تحقق چنین رویکردی می‌باشد؛ بنابراین لازم است پهنه‌بندی کیفی بر پایه آسیب‌پذیری منابع آب و شعاع حفاظتی آن‌ها و همچنین میزان آلاینده‌ها تعیین گردد. به طور کلی، پایه و اساس تعیین حریم کیفی منابع آب زیرزمینی، پهنه‌بندی و ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی در مقابل آلودگی است.

در حال حاضر قانون مدونی در زمینه حفاظت کیفی منابع آب کارست در کشور وجود ندارد و دستگاه‌های اجرایی با توجه به شرایط منطقه‌ای و محلی در تخصیص آب از این منابع به بهره‌برداران اقدام می‌کنند. در واقع، با الگوبرداری از دیگر کشورها، آیین‌نامه عمومی برای حفاظت کیفی این منابع تهیه شده است. با توجه به کیفیت مطلوب این منابع، بخش آب وزارت نیرو، این منابع را در وهله اول برای تامین آب شرب و در مرحله بعد و به صورت محدود به مصارف صنایع اختصاص داده است. در شرایط استثنایی یعنی در مناطقی که کیفیت منابع آب کارست بسیار پایین است و از محدوده مجاز آب شرب و صنعت خارج است، مجوز بهره‌برداری از آنها به منظور نیازهای آبی کشاورزی صادر می‌شود. البته در نواحی که آبخوان‌های کارستی آب مازاد داشته و این آب پس از خروج در اثر تماس با سازندهای شور و تیخیری کیفیت خود را از دست بدهد، چنانچه در این نواحی تقاضا برای آب مصارف شرب و صنعت وجود نداشته باشد لازم است این آب مازاد به مصرف کشاورزی تخصیص داده شود.

به طور کلی، عوامل هیدروژئولوژیکی نقش اساسی در نگهداشت سلامت سفره‌های آب زیرزمینی را ایفا می‌کند. با این وجود، نباید از تاثیری که نزولات آسمانی بر آسیب‌پذیری دارد غافل شد؛ به نظر می‌رسد که حتی نوع بارش (باران یا برف) نیز اثر متفاوتی بر حمل و انتقال آلاینده‌ها به درون آبخوان‌های کارستی دارد. از میان مدل‌های ذکر شده، روش‌های میلانویچ،  $PI$ ،  $RISKE$ ،  $EPIK$ ،  $PAPRIKA$  هیچگونه توجهی به بارش منطقه مورد نظر ندارند و روش‌هایی که عامل بارش را به عنوان یکی از پارامترهای اساسی در تعیین آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی نواحی کارستی در نظر می‌گیرند شامل روش‌های  $COP$ ، اسلونی،  $COP+K$ ،  $KAVA$  است؛ البته روش  $KARSTIC$  نیز تاثیر بارش را به صورت غیر مستقیم در معیار تغذیه گنجانده است. طی سال‌های گذشته، روش‌های  $EPIK$  و  $PI$  به طور ویژه برای ارزیابی آسیب‌پذیری در نواحی کارستی ارائه شدند که نتایج آنها چندان رضایت‌بخش نبوده است (گلدشایدر، ۲۰۰۵). با در نظر گرفتن نقش بارش در افزایش نفوذپذیری، تغذیه آبخوان و رقیق‌شدگی آلاینده، میتوان اهمیت آن را در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان یک ناحیه تفسیر کرد و در نتیجه، آن را به عنوان یک عامل مستقل جهت برآورد آسیب‌پذیری و حساسیت آبخوان کارستی به حساب آورد. این مهم را می‌توان در جدیدترین مقالات منتشر شده مشاهده نمود به طوری که استفاده از روش‌هایی که اثر مستقیم بارش را به عنوان یک عامل موثر در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان هر منطقه مد نظر قرار می‌دهند، دقت بیشتری در برآورد و تهیه نقشه حساسیت و آسیب‌پذیری آبخوان داشته است. بنابراین، به نظر می‌رسد که رویکرد اروپایی بهترین توصیف را از شرایط و عوامل موثر بر فرآیند آلودگی ارائه کرده است.

با توجه به گستردگی وسیع سازندهای کربناته و رخساره‌های کارستی در ایران و به ویژه در زون زاگرس و گاهاً مقدار بارش نسبتاً مشابه با برخی از کشورهای اروپایی، پیشنهاد می‌گردد که رویکرد اروپایی را به منظور تعیین آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی در محدوده زاگرس مد نظر قرار داده و از روش‌های مبتنی بر آن از جمله  $COP$ ، اسلونی،  $COP+K$ ،  $KAVA$ ، آسیب‌پذیری و در نتیجه زون‌های حفاظتی لازم را تعیین کرد. در نهایت، می‌توان با مبنا قرار دادن رویکرد اروپایی، آسیب‌پذیری و زون‌های حفاظتی آبخوان‌های کارستی کشور را تعیین و با اعتبارسنجی و صحت‌سنجی، دیگر عوامل موثر در آسیب‌پذیری آبخوان کارستی از جمله وضعیت خطواره‌های کارستی مانند تعداد، تراکم و جهت خطواره‌ها، را نیز به مدل وارد کرد و در واقع، یک مدل جدید و منطقه‌ای مختص ایران معرفی و اجرا نمود.

## منابع

- طاهری، ک.، رئیسی ع.ا.، (۱۳۸۹)، زمین شناسی، هیدروژئولوژی و مهندسی منابع کارست ایران، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس پژوهش های کاربردی منابع آب ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت، کرمانشاه، ۴۱۸ص.
- Baoxiang Z, Fanhai M (2011). Delineation methods and application of groundwater source protection zone. Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 2011 International Symposium on Volume: 1 DOI: 10.1109/ISWREP.2011.5892945 (IEEE Conference Publications): 66 - 69.
- Davis, A.D., Long, A.J. and Wireman, M., 2002. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrains. *Environmental Geology*, 42: 65-72.
- European Commission, 2007. Common implementation strategy for the Water Framework Directive (200/60/EC). Guidance Document No. 16 on Groundwater in Drinking Water Protected Areas. European Commission, Brussels.
- Ford, D. and Williams, P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons press, Chichester, West Sussex, England. 562 pp.
- Goldscheider, N., 2005. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal* 13:555-564.
- Kazakis, N., Oikonomidis, D. and Voudouris, K.S., 2015. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment with disparate models in karstic, porous, and fissured rock aquifers using remote sensing techniques and GIS in Anthemountas basin, Greece. *Environmental Earth Sciences* 74 (7): 6199-6209.
- Lerner, D.N. and Harris, B., 2009. The relationship between land use and groundwater resources and quality. *Journal of Land Use Policy* 26S: S265-S273.
- Menichini, M., Da Prato, S., Doveri, M., Ellero, A., Lelli, M., Masetti, G., Nisi, N. and Raco, B., 2015. An integrated methodology to define Protection Zones for groundwaterbased drinking water sources: an example from the Tuscany Region, Italy. *Italian Journal of Groundwater* -AS12058: 21 - 27.
- Milanovic, P., 2000. *Geological Engineering in Karst*. Zebra series in technical research publications, Belgrade, 347 p
- Raeisi E. 2002. Carbonate karst caves in Iran. In: Kranjc A (ed) *Evolution of karst: from prekarst to cessation*, Ljubljana-Postojna: 339-344.
- Vias, J.M., B. Andreo, M.J. Perles, F. Carrasco, I. Vadillo and P. Jimenez. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*, 14: 912-925.
- Zhu Y and Balke KD (2008). Groundwater protection: What can we learn from Germany?. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B* 9(3): 227-231.