آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی، جنوب شرق ایذه، با استفاده از روش COP

کاظم رنگزن
گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز
علی محرابی نژاد
کارشناس معاونت حفاظت و بهره‌برداری منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان
فرشاد علیجانی
گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
زهره استادهاشمی
دانش آموخته گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش : ۹۵/۵/۱۲

kazemrangzan@scu.ac.ir

چکیده

به منظور ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آبخوان کارستی نعل اسبی، واقع در جنوب شرق ایذه، روش COP مورد استفاده قرار گرفته است. این روش خصوصیات لایه پوشاننده بالای سطح ایستابی (عامل O)، تمرکز جریان (عامل C) و بارش (عامل P) را به عنوان پارامترهای ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی به کار می‌گیرد. خصوصیات کارست، از قبیل وجود حفرات فروبرنده (عامل C) و عوارض کارستی در حوضه توسط عوامل کاهش دهنده حفاظت طبیعی اعمال شده توسط لایه پوششی (عامل O) جبران می‌شود. عامل P قابلیت تغییر مکانی و زمانی بارش را اعمال می‌نماید که عامل انتقال آلاینده‌ها می‌باشند. نتایج با غلظت نیترات در آبخوان کارستی نعل اسبی مورد مقایسه قرار گرفت و مقایسه با این داده‌ها مزایای روش COP در ارزیابی آسیب پذیری آب‌های زیر زمینی در کارست را مشخص نمود. نتایج نشان داد که به جز بخش کوچکی از پای دماغه پلانژدار ناودیس نعل اسبی و ارتفاعات که به لحاظ آسیب پذیری در رده‌های کم و متوسط قرار می‌گیرند در بقیه مناطق کارست نعل اسبی آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد می‌باشد.

کلمات کلیدی: *آسیب‌پذیری، روش COP ، آلودگی نیترات، آبخوان کارستی، ایذه*

مقدمه

به منظور شناخت استعداد آلودگی آبخوان کارستی در نواحی مختلف، لازم است که قابلیت آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (Groundwater vulnerability) مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به عدم کارآیی اکثر روش‌های احیاء آبخوان (به دلیل مشکلات اجرایی، هزینه‌بر بودن و زمان طولانی) به ویژه در نواحی کارستی که هیچ گونه تصفیه طبیعی در محیط زیر سطحی روی نمی‌دهد می‌بایست نواحی مستعد آلودگی شناسایی گردند. این امر به بهترین وجه به واسطه مفهوم آسیب پذیری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

گام اولیه در مدیریت منابع آب زیرزمینی کارستی قابل شرب شناخت ماهیت هیدروژئولوژیک و هیدرودینامیک مخزن می‌باشد. ارزیابی‌های در مقیاس منطقه‌ای از قبیل نقشه‌های آسیب‌پذیری ابزارهایی مؤثر و کلیدی در جهت مدیریت بهینه منابع آب کارست می‌باشند. این امر ضرورت بررسی‌های مختص به سایت‌های بحرانی را در نواحی کارستی معلوم می‌نماید (Bekesi and McConchie, 2000; Aller et al., 1987).

روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به DRASTIC (Aller et al., 1987)، GOD (Foster, 1987) و AVI (Van Stempvoort et al., 1993) اشاره نمود. (Gogu and Dassargues, 2000) (Vrba and Zaporozec, 1994) مرور کلی بر روش‌های موجود تعیین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ارائه دادند. این روش‌ها عمدتاً برای حفاظت از آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های محیط متخلخل به کار برده می‌شوند. روش‌های EPIK (Doerfliger and Zwahlen, 1998; Doerfliger et al., 1999) و PI (Goldscheider et al., 2001) به طور ویژه برای ارزیابی آسیب‌پذیری در نواحی کارستی ارائه شده‌اند.

در سرتاسر دنیا آب‌های زیرزمینی آبخوان‌های کارستی به عنوان یکی از مهمترین منابع تأمین آب شرب مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در اروپا، نواحی کارستی حدود ۳۵ درصد سطح زمین را پوشش می‌دهند و در بعضی از کشورها آب‌های زیرزمینی کارستی تا ۵۰ درصد در تأمین آب شرب مشارکت دارند. در بعضی از کشورها به ویژه در خاورمیانه تنها منبع آب شیرین قابل شرب، آبخوان-های کارستی می‌باشند. آبخوان‌های کارستی به واسطه پوشش خاک نازک، تمرکز جریان در زون اپی کارست و تغذیه متمرکز از طریق حفره‌های فرو برنده در مقابل آلودگی بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. در نتیجه، آلودگی می‌تواند به آسانی به آب زیرزمینی برسد و به سرعت در مجاری کارستی و در مسافت‌های طولانی مهاجرت نماید (Goldscheider, 2005). در آبخوان‌های کارستی زمان نگهداشت آلودگی اغلب کوتاه می‌باشد و فرآیندهای ترقیق طبیعی به طور مؤثری روی نمی‌دهند. بر این اساس اداره عمومی علوم، تحقیقات، و توسعه اتحادیه اروپا با حمایت COST Action 620 (که COST مخفف COoperation in Science and Technology می‌باشد) پروژه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و خطر

پذیری برای حفاظت از آبخوان‌های کربناته (کارستی) را از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ میلادی انجام دادند.

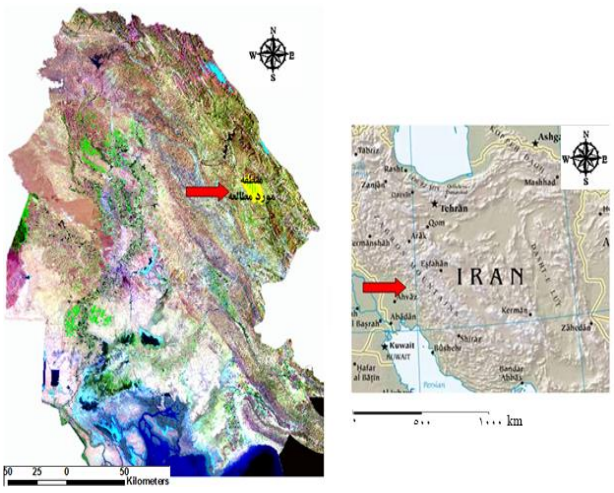
دو نوع آسیب‌پذیری برای آبخوان‌های کارستی تشخیص داده شد: آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه (Daly et al., 2002). آسیب‌پذیری ذاتی استعداد آب زیرزمینی به آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد و خصوصیات هیدروژئولوژیک یک ناحیه را در نظر می‌گیرد ولی مستقل از ماهیت آلاینده و شرایط آتی آلودگی است. آسیب‌پذیری ویژه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌ها و روابط آنها با سیستم هیدروژئولوژیکی را در نظر می‌گیرد.

روش اروپایی پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در آبخوان‌های کارستی که در قالب COST Action 620 ارائه شده چهار عامل لایه پوششی (عامل O)، تمرکز جریان (عامل C)، رژیم بارش (عامل P)، توسعه شبکه کارستی (عامل K) را در نظر می‌گیرد (Daly et al., 2002; Goldscheider and Popescu, 2004). نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با ترکیب عوامل O، C، و P تهیه می‌شوند در حالی که برای تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری یک منبع خاص (مانند چشمه یا چاه) افزودن عامل K مورد نیاز است. نقشه‌های آسیب‌پذیری ذاتی به عنوان ابزارهای مدیریت محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌بایست قابلیت صحت سنجی با ردیاب‌های طبیعی یا مصنوعی را به منظور اطمینان از شناخت تفهیمی شرایط هیدروژئولوژیکی داشته باشند (Bruyere et al., 2001; Jeannin et al., 2001; Goldscheider et al., 2001; Perrin et al., 2004).

روش‌های مرسوم (از قبیل DRASTIC, AVI, GOD, SINTACS) می‌توانند درجه آسیب‌پذیری را در مقیاس‌های منطقه‌ای در جایی که لیتولوژی-های مختلفی وجود دارند ارائه دهند (Vias et al., 2006)، ولی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی کارآیی بسیار کمی دارند و پیچیدگی‌های نواحی کارستی را مد نظر قرار نمی‌دهند. روش COP خصوصیات هیدروژئولوژیک ویژه نواحی کارستی را مد نظر قرار می‌دهد. این روش می‌تواند در شرایط با اقلیم‌های متفاوت و انواع مختلف آبخوان‌های کارستی (سیستم‌های انتشاری و مجرایی) به کار رود. علاوه بر این، روش COP متغیرها، پارامترها و عوامل مشابه با موارد ارائه شده در روش اروپایی (European approach) را مورد استفاده قرار می‌دهد (Daly et al., 2002; Zwahlen, 2004). سیستم طبقه‌بندی و کمی نمودن هر پارامتر با استفاده از نرخ دهی و تلفیق متغیرها بر اساس نمودار روش COP انجام می‌شود که شرح آن در روش تحقیق ارائه شده است.

هرچند که روش‌های ارزیابی در آبخوان‌های آبرفتی به خوبی مورد بررسی قرار گرفته و توسعه یافته‌اند ولی تا کنون روش‌های استاندارد محدودی ارائه شده‌اند که می‌توانند آسیب‌پذیری در نواحی کارستی را پهنه‌بندی نمایند. یکی از این روش‌ها که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، روش COP می‌باشد که برای اولین بار در ایران در آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه به کار گرفته شده است. واژه COP از سه عامل اولیه مورد استفاده در روش شامل تمرکز جریان، لایه‌های پوششی، و بارش می‌آید (flow Concentration, Overlying layers and Precipitation). روش COP برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌های کربناته در چهارچوب استاندارد اروپایی European COST Action 620 ارائه شده است. این روش خصوصیات لایه‌های پوشاننده سطح آب زیرزمینی (عامل O)، تجمع جریان آب زیرزمینی (عامل C) و بارش بر روی آبخوان (عامل P) را به عنوان پارامترهای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌دهد. این روش خصوصیات کارستی از قبیل حضور شکستگی‌های باز، غار، و حفرات فروبرنده (Swallow holes) (عامل C) و مساحت حوضه آبگیر این عوارض کارستی را به صورت عوامل کاهنده محافظت طبیعی اعمالی توسط لایه‌های پوشاننده (عامل O) در نظر می‌گیرد. عامل P توزیع مکانی و زمانی بارش را به عنوان عامل انتقال آلاینده مد نظر قرار می‌دهد (Vias et al., 2006).

منطقه مورد مطالعه، دشت ایذه واقع در شمال شرق استان خوزستان می‌باشد. شهرستان ایذه که در جنوب شرق دشت مذکور قرار گرفته است، در ۹۵۰ کیلومتری جنوب غرب تهران و ۱۷۵ کیلومتری شمال شرق اهواز واقع شده است. محدوده مورد مطالعه بین ۳۱ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۲ درجه عرض جغرافیایی و ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۲ دقیقه طول جغرافیایی واقع گردیده است. دشت ایذه حدود ۱۵۰ کیلومترمربع وسعت دارد. (شکل ۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و (شکل ۲)تصویری ناودیس نعل اسبی ایذه را نشان می‌دهد. آبخوان آبرفتی ایذه دارای آلودگی شدید نیتراته و باکتریایی می‌باشد. فعالیت‌های کشاورزی، نفوذ فاضلاب شهری، عمق کم سطح ایستابی و خصوصیات مواد آبرفتی درجه تأثیر مختلفی بر روی میزان آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت ایذه اعمال می‌نمایند. آلودگی باکتریایی آب‌های زیرزمینی دشت ایذه باعث گردیده است تا چاه‌های آبرفتی که برای تأمین شرب شهر ایذه مورد پمپاژ واقع می‌شدند، در طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۷۰ مسدود گردند. بدین ترتیب برای تأمین آب شرب شهر و روستاهای اطراف ایذه، اقدام به حفر ۱۱ حلقه چاه آهکی در آبخوان کارستی نعل اسبی در جنوب شرق دشت ایذه در طی سالیان ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۷ گردیده است. بر اثر پمپاژ بیش از حد از چاه‌های آهکی ایذه و افت سطح آب کارست، جهت جریان آب زیرزمینی از آبخوان آبرفتی به سمت آبخوان کارستی به طور موضعی معکوس گردیده و در نتیجه هاله آلودگی به کارست رسوخ نموده است (ناصری و علیجانی، ۱۳۸۲). این پدیده باعث افزایش غلظت نیترات آب‌های کارستی در آبخوان نعل اسبی شده است به طوری که در سال ۱۳۸۷ چاه آهکی کلدوزخ از مدار بهره‌برداری خارج شده است. هدف از این تحقیق استفاده از روش جدید COP جهت پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی نعل اسبی واقع در جنوب شرق ایذه در محیط GIS می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت دشت ایذه بر روی تصویر ماهواره‌ای خوزستان

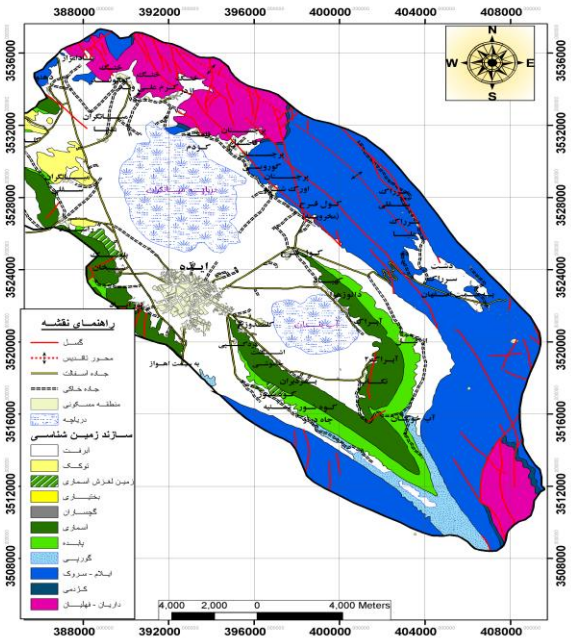
شکل ۲. تصویری از ناودیس نعل اسبی و دریاچه آب بندان – دید به سمت شرق

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

دشت ایذه از لحاظ زمین‌شناسی در ناحیه زاگرس چین‌خورده یا زاگرس خارجی قرار می‌گیرد. دشت ایذه حوضه آبگیر مسدودی است که کلیه آب‌های سطحی از اطراف به سمت دو دریاچه نسبتاً وسیع در شمال و جنوب شرقی آن به نام‌های میانگران و آب‌بندان وارد می‌شوند. دشت ایذه یک پولیه می‌باشد و عوارض و پدیده‌های ژئومورفولوژیک کارست در آن گسترش قابل ملاحظه‌ای دارند. دشت مذکور در داخل ناودیس بسته‌ای با محور شمال غربی – جنوب شرقی قرار دارد. دماغه جنوب شرقی ناودیس به صورت نعل اسبی است که دریاچه آب‌بندان را محصور کرده است. سازندهای زمین‌شناسی که در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند مربوط به کرتاسه زیرین تا عهد حاضر می‌باشند (شکل ۳). آهک‌های ضخیم لایه خاکستری رنگ سازند داریان – فهلیان قدیمی‌ترین سنگ‌های بیرون زده در منطقه هستند که بر روی آن سازند شیلی کژدمی، سازندهای آهکی ایلام – سروک، سازند شیلی گورپی، سازند مارنی پابده، سازند آهکی آسماری، سازند گچساران، کنگلومرای توتک و آبرفت‌های عهد حاضر به ترتیب قدمت قرار گرفته‌اند. رسوبات آبرفتی دشت ایذه بر اساس لوگ چاه‌ها، پیزومترها و نتایج عملیات ژئوفیزیکی عمدتاً شامل رسوبات دانه‌ریز رس، سیلت و رسوبات دانه‌درشت ماسه‌ای و گراولی در بخش‌های عمقی است. عمق رسوبات آبرفتی از ۳۰ متر در حاشیه دشت تا بیش از ۱۵۰ متر در شمال دشت متغیر است.

به علت مقاومت و سختی خاص آهک‌های آسماری این سازند ارتفاعات و بخش‌های مقاوم منطقه زاگرس چین‌خورده را تشکیل می‌دهد و غالباً پوشش خارجی تاقدیس‌های طویل و پشت نهنگی را به وجود می‌آورد. در منطقه مورد مطالعه ارتفاعات ناودیس نعل اسبی واقع در ۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر ایذه از سازند آسماری پوشیده شده است. همچنین در نواحی جنوبی و غربی ایذه بین نورآباد و میانگران سفلی، آهک‌های کرم تا قهوه‌ای رنگ سازند آسماری، ارتفاعاتی را راستای شمال غربی–جنوب شرقی به وجود آورده است.

لایه‌های ضخیم تا توده‌ای آهک آسماری دارای حفرات انحلالی فراوان کوچک و بزرگ در نواحی مختلف ناودیس مورد مطالعه می‌باشند. فشار حاصل از حرکات تکتونیکی موجب ایجاد درز و شکاف‌های فراوان و متقاطع شده است که عرض بازشدگی‌ها متجاوز از چندین سانتی‌متر می‌باشد. پدیده‌های جوانتر شکستگی و گسل‌ها باعث ارتباط عمودی درز و شکاف‌های انحلالی شده است که به موجب آن آب زیرزمینی به راحتی بین لایه‌های آهکی جریان می‌یابد. گسترش پدیده‌های انحلالی در اعماق لایه‌های آهکی تاقدیس آسماری احتمالاً باعث ایجاد حفرات و مجاری وسیع گردیده و مخزن عظیم آب کارستی را به وجود آورده است. ظرفیت ذخیره کارست آسماری زیاد و مخزن عظیم آب زیرزمینی را در خود جای داده است (ناصری و علیجانی، ۱۳۹۱).



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ناودیس نعل اسبی ایذه

مهمترین عارضه چین‌خوردگی در منطقه مورد مطالعه، ناودیس نعل اسب مانند سازند آسماری می‌باشد. این سیما در حقیقت ناودیس پلانژ داری با شیب به سمت شمال غرب می‌باشد که بین تاقدیس‌های پیون و شاویش قرار گرفته است. عوامل تکتونیکی فشارشی و کششی موجب تشکیل شکستگی‌های کوچک و بزرگ در آهک شده است، نفوذ آب از ریزش‌های جوی در فضای تخلخل شکستگی طی سالیان متوالی و نهایتاً توسعه درزه‌ها و مجاری انحلالی در توده آهکی شرایط تشکیل مخازن آب کارستی در این ناحیه را فراهم آورده است. سیمای نعل اسبی در واقع قسمت جنوبی ناودیس دوپلانژه ای است که امتداد محور آن شمال غربی – جنوب شرقی می‌باشد. یال‌های این سیما در جهت پلانژ ناودیس (شمال غرب) به درون آبرفت فرو می‌رود. در میان این نعل اسب دریاچه آب‌بندان واقع شده است. مقاطع زمین‌شناسی نشان می‌دهند که این ناودیس مانند حوضه‌ای می‌باشد که از زیر توسط سازند پابده مسدود شده است . این حوضه مخزن اصلی آبخوان کارستی می‌باشد. مساحت رخنمون سازند آسماری در این ناودیس حدود ۲۰ کیلومترمربع می‌باشد.

حفاری‌های اکتشافی و چاه‌های بهره‌برداری در یال‌های سیمای نعل اسبی نمایانگر وجود آبخوانی با قابلیت آبدهی بالا در این سیما می‌باشد. کل عمق چاه‌های مورد نظر در سازند آسماری هست و از آب ذخیره شده در خلل و فرج و شکستگی‌ها و مجاری این سازند برداشت می‌شود. تعداد پنج حلقه چاه با دبی ۶۰ الی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه که وظیفه تأمین آب شرب شهر ایذه و روستاهای حومه را بر عهده دارند در سازند آسماری و در سیمای نعل اسبی حفرشده‌اند. شکاف‌ها و حفرات انحلالی مختلفی در قسمت‌های بیرون‌زده این سازند ملاحظه می‌شوند که

به نام‌های محلی تحت عناوین اشکفت‌سلمان، اشکفت جاموشی و اشکفت گاو نام‌گذاری شده‌اند.

داده‌ها و روش تحقیق

به منظور مدل‌سازی پتانسیل آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه، مراحل آماده‌سازی نقشه‌های معیار، نرخ‌بندی و تلفیق اعمال گردیده است. پردازش، تلفیق و تجزیه و تحلیل داده‌های مورد نیاز برای مدل COP، همچنین نمایش نتایج در مراحل مختلف کار، در محیط GIS انجام گرفته است. به همین جهت از بسته نرم‌افزاری ArcGIS 9.2 استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز برای تهیه پارامترهای COP از منابع مختلف و با فرمت‌های گوناگون جمع آوری شده است. جهت ساخت پایگاه اطلاعاتی، داده‌های با فرمت نقطه‌ای ابتدا در محیط نرم افزار Excel تهیه گردیده، سپس به محیط GIS آورده شد. این داده‌های نقطه‌ای شامل موقعیت جغرافیایی و ارتفاع چاه‌های آهکی، و پتانسیل کارست شدگی می‌باشند. همچنین بر روی جداول داده‌های وکتوری موجود، ویرایش انجام گرفته است. تمامی داده‌ها به یک سیستم تصویر (UTM) و یک سیستم مرجع (WGS84) در آمدند. علاوه بر ArcGIS 9.2، نرم‌افزارهای دیگری دراین تحقیق مورد استفاده قرار گرفته که شامل Envi 4.2 و PCI Geomatica (9.1) می‌باشند.

هدف نهایی از تهیه نقشه‌های معیار، تلفیق آنها و به دست آوردن نقشه آسیب‌پذیری منطقه می‌باشد. جهت تلفیق، نقشه‌های معیار باید هم مقیاس باشند. زیرا نقشه‌های معیار تهیه شده به دلیل هم مقیاس نبودن، با یکدیگر قابل مقایسه نمی‌باشند. در این تحقیق هم مقیاس سازی به روش قطعی صورت گرفته است. با توجه به آنکه ماهیت سیستم‌های مجرایی کارستی با تغییرات ناگهانی و واضح مشخص می‌باشند بنابراین استفاده از هم مقیاس سازی قطعی نتایج صحیح‌تری را نسبت به هم مقیاس سازی فازی به دست می‌دهد. جهت هم مقیاس‌سازی به روش قطعی، با توجه به دانش کارشناسی و با استفاده از تابع طبقه‌بندی مجدد، تمام نقشه‌های معیار در محدوده ۰ تا ۱ با تصحیح شرایط منطبق بر منطقه ایذه (محرابی نژاد، ۱۳۸۹) مبتنی بر الگوی COP (شکل ۴) طبقه‌بندی شده‌اند.

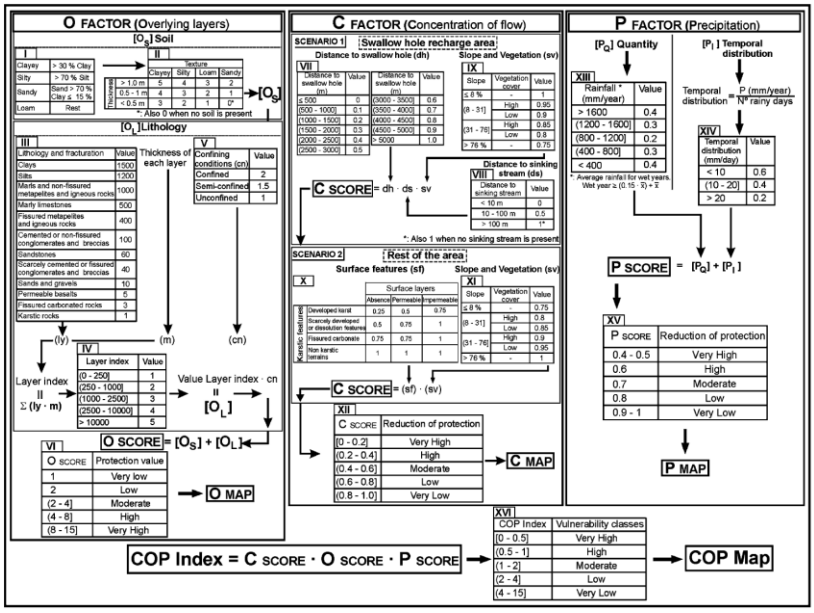
بحث

عامل O حفاظت موجود از آبخوان که بوسیله خصوصیات فیزیکی و ضخامت لایه‌های بالای زون اشباع اعمال می‌شود را در نظر می‌گیرد. در روش COP فقط دو لایه با نقش هیدروژئولوژیکی مهم به منظور ارزیابی عامل O در نظر گرفته می‌شوند که شامل خاک‌ها (Os) و لیتولوژی لایه‌های پوشاننده زون غیر اشباع (Ol) می‌باشند. لایه خاک کارست نعل اسبی ایذه نشان‌دهنده دوطبقه خاک ماسه‌ای و آهک برهنه بدون رخنمون خاک می‌باشد. معیار ارزیابی برای به کمیت در آوردن پارامتر Ol نوع سنگ (که خصوصیات هیدروژئولوژیک، عمدتاً تخلخل مؤثر و هدایت هیدرولیکی) و درجه خردشدگی (ly)، ضخامت هر لایه (m) و نوع شرایط محبوس شوندگی (cn) می‌باشد. مقدار نسبت داده شده به پارامتر cn بیشترین محافظت را به آبخوان محبوس می‌دهد در حالی که آبخوان غیر محبوس به‌وسیله این پارامتر (cn=1) متأثر نمی‌گردد. ظرفیت ترقیق با جمع نمودن لایه‌های حفاظتی افزایش می‌یابد. لایه O با جمع نمودن خاک زیر سطحی (Os) و لیتولوژی (Ol) به دست آمده و منطبق با آن ارزش حفاظتی تعیین شده است (شکل ۵ الف).

عامل C حالت تعدیل‌کننده‌ای از عامل O می‌باشد و نشان‌دهنده پتانسیل میان بر کردن آب از حفاظت ایجاد شده به‌وسیله لایه‌های پوششی می‌باشد. عامل C نمایانگر مقداری از بارندگی است که رو یا مجاور رخنمون آبخوان در حفرات فرو برنده آب متمرکز شده و از زون غیر اشباع میان‌بر می‌شود. با توجه به نحوه توسعه کارست فلویو پومنت نعل اسبی ایذه و تکامل کارست نابالغ در منطقه سناریو دو جهت تعیین لایه C مورد استفاده قرار گرفته است. لایه C در تحت این شرایط به‌وسیله ترکیب تنها سه متغیر ارزیابی می‌شود. عوارض سطحی (sf)، شیب (s) و پوشش گیاهی(v). پارامتر عوارض سطحی آن دسته از اشکال ژئومورفولوژیکی مختص به سنگ‌های کربناته و حضور یا فقدان هرگونه لایه پوشاننده‌ای (نفوذپذیر یا نفوذناپذیر) که تعیین کننده اهمیت فرآیندهای رواناب و / یا نفوذ می‌باشد را در نظر می‌گیرد. پارامتر sf آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه بر اساس داده‌های دبی – افت آزمایش پمپاژ چاه‌های آهکی موجود در تاقدیس و روند تکامل کارست در ناودیس‌ها از دماغه به سمت یال‌ها و بر اساس شکل ۴ به دست آمده است. لایه sf آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه نشانگر آنست که از دماغه تاقدیس به سمت یال‌ها تکامل کارست شدگی کمتر می‌شود. ارزیابی پوشش گیاهی و شیب‌بر خلاف روشی که در سناریو یک انجام می‌شود صورت می‌گیرد. وجود پوشش گیاهی در هر منطقه سرعت جریان آب‌های سطحی را کاهش داده و سبب نفوذ بیشتر آب به داخل خاک می‌گردد (صابری و همکاران، ۱۳۹۱). هنگامی که شیب‌ها تندتر می‌باشند و پوشش گیاهی وجود ندارد، رواناب و پتانسیل آلودگی از سمت آبخوان و نه به سمت اشکالی مانند حفره‌های فرو برنده آب جریان پیدا می‌کند. این حالت در شیب‌های آبخوان‌های کربناته در نواحی کوهستانی معمول است. برای تهیه نقشه شیب از فایل‌های ارتفاعی رقومی ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده گردید. این فایل‌ها شامل خطوط میزان، نقاط ارتفاعی و آبراهه می‌باشند. با استفاده از این عوامل مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه در محیط Work Station تهیه گردید. پس از ویرایش DEM به دست آمده، در محیط نرم‌افزار ArcGIS، در قسمت 3D Analyst و با استفاده از تابع Surfer Analysis نقشه شیب منطقه به دست آمد و سپس طبقه‌بندی مجدد گردید. پوشش گیاهی در منطقه نعل اسبی ایذه کم در نظر گرفته شده است. در نهایت لایه sv آبخوان به دست آمد. برای به دست آوردن رتبه C در سناریو ۲، پارامتر پوشش گیاهی-شیب (sv)، با پارامتر عوارض سطحی (sf) وزن‌دهی شده است و لایه C کارست نعل اسبی ایذه به دست آمد (شکل ۵ ب).

عامل P شامل مقدار بارش و عامل‌هایی که نرخ نفوذ را افزایش می‌دهند مانند تناوب، توزیع زمانی، مدت و شدت بارش‌های سیل‌آسا می‌باشد. این عامل‌ها به تعیین توانایی بارش برای حمل آلاینده‌ها از سطح به آب زیرزمینی کمک می‌کنند. هر چقدر ظرفیت حمل آلاینده‌ها به سمت آبخوان زیادتر باشد، آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. عامل P به وسیله دو زیر عامل ارزیابی می‌شود. مقدار بارش (PQ) و توزیع زمانی (PI). زیر عامل (PQ) تأثیر مقدار بارش و تغذیه سالانه را بر آسیب‌پذیری آب زیرزمینی توصیف می‌کند که با میانگین بارش سالانه سال‌های مرطوب مطابقت دارد. زیر عامل (PI) توزیع زمانی بارش را در یک دوره زمانی معین در نظر می‌گیرد و از این رو نمایانگر شدت بارش می‌باشد.

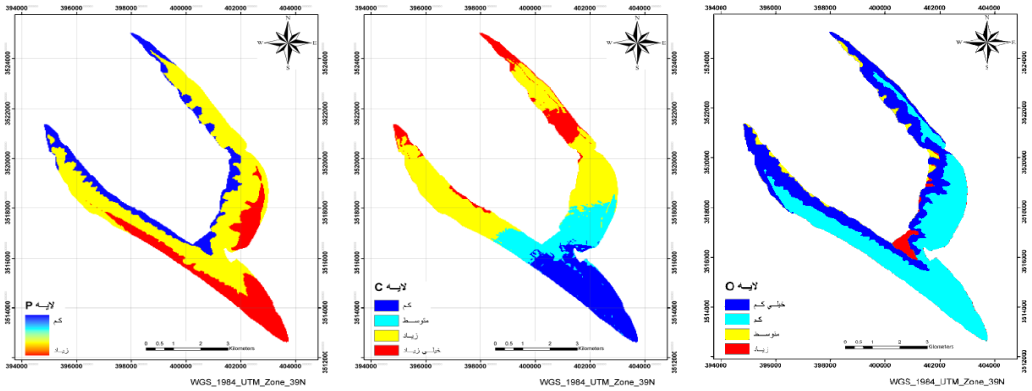
جهت تعیین لایه P در ابتدا گرادیان سالانه بارندگی بر مدل رقومی ارتفاع (DEM) اعمال گردید تا توزیع بارندگی بدست آمد. بارش به دست آمده طبقه‌بندی مجدد گردید که در نهایت منطقه به دو طبقه تقسیم‌بندی شد.



شکل ۴. نمودار روش (Vias et al., 2006 COP)

با تقسیم نمودن میانگین بارش سالانه بر تعداد روزهای باندگی پارامتر توزیع زمانی بارش حاصل شد. مقادیر نسبت داده شده به زیر عامل (PI) با زیادتر شدن مجموع بارش سالانه و تعداد کمتر روزهای بارانی، افزایش می‌یابند. این باعث بیشتر شدن تغذیه می‌شود که نفوذ سریع مجاری کارستی و شکاف‌ها و در نتیجه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را افزایش می‌دهد. بارش روزانه زیادتر، مقدار زیادتری رواناب به سمت حفرات فرو برنده مهیا کننده نفوذ متمرکز می‌باشند را ممکن می‌سازند. جایی که نفوذ انتشاری و کند می‌باشد، زیر عامل PI کم است، معمولاً این شرایط حجم تغذیه نسبتاً کمتری را دارا می‌باشند. با ضرب نمودن دو پارامتر PQ و PI در همدیگر و طبقه‌بندی لایه حاصل بر اساس شکل ۴، لایه P حاصل شد (شکل ۵ ج). مقدار عامل P در حاشیه ارتفاعات جنوبی و جنوب غربی ناودیس و در محل دماغه پلانژدار ناودیس حداکثر می‌باشد. به سمت پایین دست آهک، مقدار تأثیر عامل P کاهش‌یافته و در محل تماس آهک با آبرفت در بازوهای ناودیس به حداقل می‌رسد.

با توجه به لایه‌های اطلاعاتی نرخ‌بندی شده، نمایه قابلیت آسیب‌پذیری COP با ضرب نمودن سه عامل C، O و P برای آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه محاسبه گردیده است. نمایه حاصل از روش COP برای آسیب‌پذیری آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه بین ۰/۰۹ تا ۲/۹۹ متغیر می‌باشد (شکل ۶). بر اساس پیشنهاد ارائه شده توسط Vrba and Zaporozec (1994) مقادیر این نمایه در پنج طبقه گروه بندی می‌شوند (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم). مقادیر نمایه COP در واقع تصحیحی بر روی مقادیر عامل O، شامل طبقه‌بندی مجدد گروه‌ها و آسیب‌پذیری همراه آن‌ها می‌باشد.



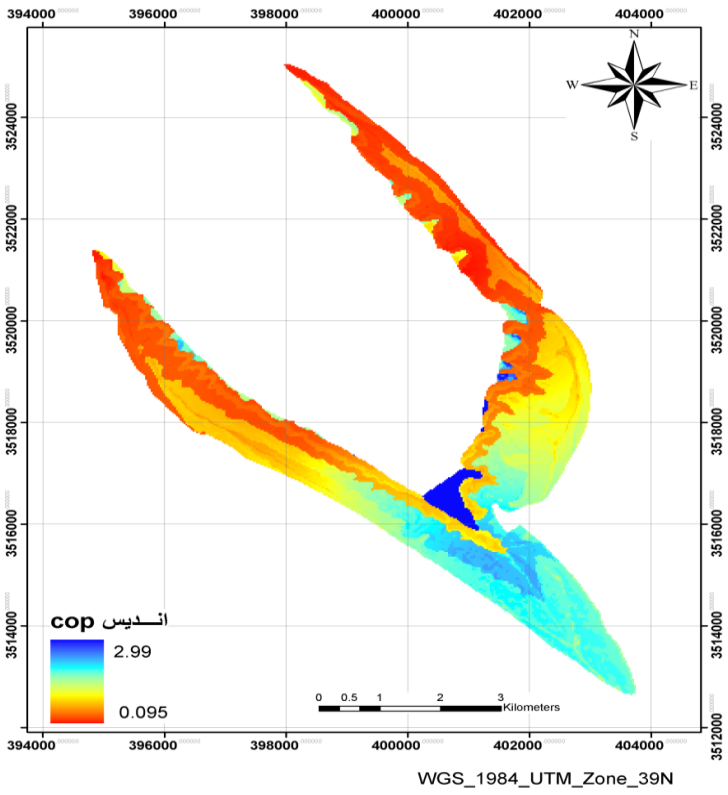
(الف) لایه O (ب) لایه C (ج) لایه P

شکل ۵. لایه‌های تهیه شده برای روش آسیب‌پذیری COP در آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه

جهت مطالعه آلودگی آب‌های زیرزمینی کارست ایذه نمونه‌های آب چاه‌های آهکی در چهار دوره جهت یون نیترات مورد سنجش واقع‌شده‌اند. نمودار خطر آلودگی نیتراته آب چاه‌های آهکی ایذه که برای شرب شهر مورد بهره‌برداری واقع می‌گردند (جدول ۱)، نمایانگر آلودگی زیاد آبخوان کارستی نعل اسبی به ویژه در نواحی کلدوزخ تا بندان می‌باشد. چاه آهکی کلدوزخ (K1) در دو دوره غیر قابل شرب می‌باشد. چاه آهکی جاموشی (K2) عمدتاً دارای خطر زیاد می‌باشد. هاله آلودگی به سمت بندان در حال نفوذ است به طوری که چاه آهکی بندان (K3) به طوری که غلظت نیترات در چاه مذکور به حد خطرناک رسیده است. با توجه به این مساله می‌بایست سه چاه مذکور سریعاً پلمب شده و منابع آب جایگزین برای آنها مشخص شود. چاه‌های آهکی بردبران ۱ و ۲ (K4 و K5) نیز در دوره‌های مرطوب با فروشویی آلاینده‌ها و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی دارای خطر آلودگی زیاد می‌شوند. با توجه به ادامه بهره‌برداری بیش از حد از چاه‌های مذکور و مهاجرت ابر آلودگی نیتراته پیش‌بینی می‌شود که آب چاه‌های مذکور نیز تا چند سال آلاینده نیتراته و غیر قابل شرب شوند.

(شکل ۷)نقشه طبقات آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه که بر اساس روش COP حاصل شده است را نشان می‌دهد. نقشه آسیب‌پذیری به دست آمده بیانگر آنست که ۱/۶ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای آسیب‌پذیری کم، ۲/۱ درصد آسیب پذیری متوسط، ۴۰/۷ درصد آسیب پذیری زیاد، و ۵۵/۶ درصد آسیب پذیری خیلی زیاد می‌باشد.

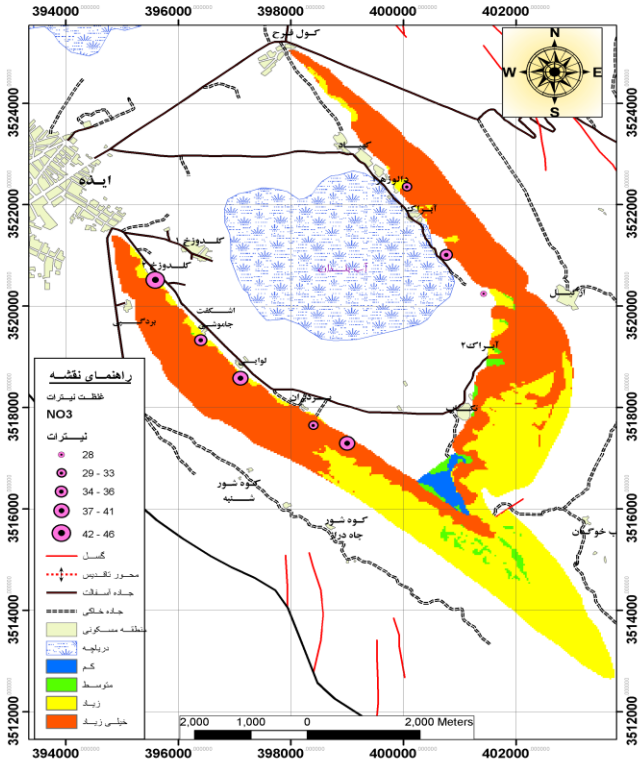
به جز بخش کوچکی از پای دماغه پلانژدار ناودیس نعل اسبی و نوارهای کوچک و بریده‌ای در قسمت ارتفاعات پلانژ ناودیس که به لحاظ آسیب‌پذیری در رده‌های کم و متوسط قرار می‌گیرند در بقیه مناطق کارست نعل اسبی آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد می‌باشد. با مقایسه نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه با داده‌های غلظت نیترات در بهمن ماه ۸۶ (شکل ۷) تطابق نقشه پتانسیل حاصل با آلودگی واقعی به خوبی مشخص می‌باشد. در این دوره غلظت نیترات آب چاه‌های کارستی متأثر از نفوذ آلاینده‌های سطح کارست به واسطه فروشویی افزایش شدیدی نشان می‌دهد. در یال‌های ناودیس و با فاصله کمی از دماغه پلانژ دار آسیب‌پذیری آبخوان کارستی به شدت زیاد می‌شود. در یال‌های ناودیس عمده چاه‌های آهکی در حال بهره‌برداری متمرکز می‌باشند که به شدت مورد بهره‌برداری واقع می‌گردند. با توجه به وجود روستاهای دشت ایذه در مجاورت حاشیه ارتفاعات ناودیس نعل اسبی عملاً خطر و ریسک آلودگی کارست در این نواحی زیاد می‌باشد. تمرکز بهره‌برداری از کارست باعث معکوس شدن موضعی جهت جریان از آبرفت به سمت کارست به‌ویژه در خشک سالی‌ها می‌شود و این باعث ورود آلاینده ها از آبخوان آبرفتی به سمت کارست و در نتیجه تشدید آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه می‌شود.



شکل ۶. نقشه نمایه COP آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه

نام چاه	اردیبهشت ۸۶	مهر ۸۶	آذر ۸۶	بهمن ۸۶
k1	۸.۹	۴۰.۱	۴۵.۵	۴۵.۶
k2	۱۷.۱	۳۹	۳۰.۹	۳۵.۷
k3	۱۳.۶	۳۵.۸	۳۸	۴۹.۹
k4	۱۲.۲	۲۰.۴	۲۳.۴	۳۲.۶
k5	بدون داده	۱۹.۶	۲۱.۱	۴۱.۳
k7	۱۸.۱	۲۵	۲۸.۵	۳۵.۴
k9	۲۵.۴	۲۹.۶	۳۵.۲	۲۸.۳
k10	۲۶	بدون داده	بدون داده	۳۲.۷
بدون خطر	آلودگی کم	آلودگی متوسط	آلودگی زیاد	غیر قابل شرب

جدول ۱. نمودار خطر آلودگی نیتراته آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه



شکل ۷. تطابق نقشه پتانسیل آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی حاصل از روش COP با داده‌های نیترات آب چاه‌های آهکی

نتیجه‌گیری

نمایه آسیب‌پذیری حاصل از روش COP برای آسیب‌پذیری آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه بین ۰/۰۹ تا ۲/۹۹ متغیر می‌باشد. نقشه طبقات آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه که بر اساس روش COP حاصل شده بیانگر آنست که ۱/۶ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای آسیب پذیری کم، ۲/۱ درصد آسیب پذیری متوسط، ۴۰/۷ درصد آسیب پذیری زیاد، و ۵۵/۶ درصد آسیب پذیری خیلی زیاد می‌باشد. با مقایسه نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان کارستی نعل اسبی ایذه با داده‌های غلظت نیترات در بهمن ماه ۸۶ تطابق نقشه پتانسیل حاصل با آلودگی واقعی به خوبی مشخص می‌باشد. در این دوره غلظت نیترات آب چاه‌های کارستی متأثر از نفوذ آلاینده‌های سطح کارست به واسطه فروشویی افزایش شدیدی نشان می‌دهد. به جز بخش کوچکی از پای دماغه پلانژ دار ناودیس نعل اسبی و نوارهای کوچک و بریده‌ای در قسمت ارتفاعات پلانژ ناودیس که به لحاظ آسیب‌پذیری در رده‌های کم و متوسط قرار می‌گیرند در بقیه مناطق کارست نعل اسبی آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد می‌باشد. در یال‌های ناودیس و با فاصله کمی از دماغه پلانژ دار آسیب‌پذیری آبخوان کارستی به شدت زیاد می‌شود. در یال‌های ناودیس عمده چاه‌های آهکی در حال بهره برداری متمرکز می‌باشند که به شدت مورد بهره‌برداری واقع می‌گردند. محاسبه شاخص COP در محیط GIS و نمایش آن، می‌تواند نتایج بسیار خوبی در تعیین پتانسیل آلودگی در نواحی کارستی ارائه دهد و مدیریت منابع آب و کاربری اراضی را بهبود بخشد. با توجه به آنکه ماهیت سیستم‌های مجرایی کارستی با تغییرات ناگهانی و واضح مشخص می‌باشند بنابراین استفاده از هم مقیاس سازی قطعی نتایج صحیح‌تری را نسبت به هم مقیاس سازی فازی به دست می‌دهد. نرخ‌بندی‌هایی که در روش COP برای هم مقیاس کردن نقشه‌های معیار به کار می‌رود، براساس روش قطعی می‌باشد. با توجه به تراکم جمعیتی و تمرکز روستاها در ناودیس نعل اسبی ایذه می‌بایست جهت حفاظت از این منابع آب ارزشمند، راهکارهای زیست محیطی ویژه‌ای برای نواحی با خطر آلودگی زیاد در نظر گرفت.

منابع

صابری ع.، رنگزن ک.، مهجوری ر.، کشاورزی م.ر. ، ۱۳۹۱. پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و GIS به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در تاقدیس کمستان استان خوزستان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۶، صفحه ۱۱ تا ۲۰.

محرابی نژاد ع. ۱۳۸۹. پهنه بندی آسیب‌پذیری آبخوان کارستی ایذه: کاربرد روش COP در محیط GIS. پایان نامه کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS. دانشگاه شهید چمران.

ناصری ح.ر. علیجانی ف.، ۱۳۸۲. هیدروژئوشیمی و آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت ایذه. سازمان آب و برق خوزستان، تحقیقات و استانداردهای مهندسی آب.

ناصری ح.ر. علیجانی ف.، ۱۳۹۱. تحلیل سیستم‌های کارست سازندهای آسماری و ایلام – سروک در جنوب غرب ایذه. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۳، صفحه ۹۴ تا ۱۰۴.

Aller, L. T., Bennett H. J. R., Lehr R., Petty J., Hackett G., 1987, DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using geo- hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency Report. EPA600/2–EP87/036.

Bekesi, G., McConchie J., 2000, Empirical assessment of influence of the unsaturated zone on aquifer vulnerability, Manawatu region, New Zealand. Ground Water, v. 38, no. 2, p. 193-199.

Bruyere S., Jeannin P.Y., Dassargues A., Goldscheider N., Popescu C., Sauter M., Vadillo I., Zwahlen F., 2001, Valuation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach. 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besanc¸on 20–22 September 2001. Sci. Tech. Environm. Mem., no. 13, p. 67–72.

Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu C., Zwhalen F., 2002, Main concepts of the "European Approach" for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. Hydrogeol. J., v. 10, no. 2, p. 340–345.

Doerfliger N., Zwahlen F., 1998, Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK) – Application to Groundwater Protection Zones. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern.

Doerfliger N., Jeannin P.Y., Zwahlen F., 1999, Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environ. Geol., v. 39, no. 2, p. 165–176.

Foster S. .S. D, 1987, Fundamental concepts in aquifer vulnerability,pollution risk and protection strategy. In: Van Duijevenboden W., Van Waegeningh H.G. (eds.) Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, v. 38. TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, The Hague, p. 69–86

Gogu R. C. and A. Dassargues, 2000, Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology, v. 39, no. 6, pp. 549-559.

Goldscheider N., 2005, Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. Hydrogeol. J., v. 13, p. 555–564.

Goldscheider N., Popescu C., 2004, The European approach vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. European Commission, Brussels, 17–21.

Goldscheider N., Hotzl H., Fries W., Jordan P., 2001, Validation of a vulnerability map (EPIK) with tracer tests. 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besan_on 20–22 September 2001. Sci. Tech. Environ. M., v. 13, p. 167–170.

Jeannin P. Y., Cornaton F., Zwahlen F., Perrochet P., 2001, VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besanc¸on 20–22 September 2001. Sci. Tech. Environm. Mem., v. 13, p. 185–188.

Perrin J., Pochon A., Jeannin P.Y., Zwahlen F., 2004, Vulnerability assessment in karstic areas: validation by field experiments. Environ. Geol., v. 46, p. 237–245.

Vias J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I., Jiménez P., 2006, Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Hydrogeol. J., v. 14, no. 6, p. 912–925.

Van Stempvoort D., Ewert L., Wassenaar L. I., 1993, Aquifer vulnerability index: A GIS based method for ground water vulnerability mapping. Canadian Water Resources Journal, v. 18, no. 1, p. 25-37.

Vrba J., Zoporozec A., 1994, Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH International Contribution for Hydrogeology, v. 16.

Zwahlen F., 2004, Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST action 620). European Commission, Brussels (ed.).