پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۱۲، شماره ۲۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۰، از صفحه ۳۱ تا ۴۱

Dor: 20.1001.1.20089597.1400.12.24.3.5

ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین آمار و GIS (مطالعه‌ی موردی: باغات انگور شهر ملایر)

میرمهرداد میرسنجری* [۱]، فاطمه محمدیاری [۲]، آرزو سلیمانی [۳]، مسعود حاتمی‌منش [۳]

۱. استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست و منابع طبیعی دانشگاه ملایر، ایران
۲. دکتری آمایش محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست و منابع طبیعی دانشگاه ملایر، ایران
۳. دانشجوی دکتری آلودگی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست و منابع طبیعی دانشگاه ملایر، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷؛ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۰۷/۰۷)

چکیده

آب‌های زیرزمینی به عنوان بخش مهمی از آب‌های تجدیدپذیر اکوسیستم به حساب می‌آیند. بنابراین، کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی خطری بزرگ در راه توسعه کشاورزی به خصوص در نواحی خشک و نیمه‌خشک است. کاربرد صحیح آفت‌کش‌ها در کشاورزی به طوری که موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی نشود، مستلزم شناخت چگونگی انتقال این آلاینده‌ها به آب زیرزمینی و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از آلودگی آفت‌کش‌هاست. در این راستا در مطالعه حاضر آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از آفت‌کش‌ها در باغات انگور شهر ملایر، در سه سناریو آسیب‌پذیری در شرایط متعارف، نامتعارف و بهینه با استفاده از سه شاخص GUS, RF و AF ارزیابی شد. بدین منظور ۹ آفت‌کش Diazinon, Malathion, Dursban Or Chlorpyrifos, Confidor Or Imidacloprid, Dimethoate, Linuron, Fenvalerate, Metsulfuron و Propargite مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از روش کریجینگ در نرم افزار GIS تهیه شد. در سناریوی اول، از مقادیر Koc و t1/2 متعارف آفت‌کش‌ها استفاده شد. همچنین آسیب‌پذیری در دو سناریوی دیگر به صورت، آسیب‌پذیری در بدترین شرایط و آسیب‌پذیری در بهترین شرایط ارزیابی شد. سپس با توجه به مقدار منطقه‌ای شاخص‌های مختلف، رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها با روش برنامه‌ریزی مرکب انجام شد. در نهایت با تلفیق نتایج، آفت‌کش‌ها به سه گروه مناسب، متوسط و نامناسب تقسیم شدند. نتایج نشان داد که احتمال آسیب‌پذیری در قسمت‌های شمالی منطقه مورد مطالعه کم و قسمت جنوبی منطقه دارای بیشترین احتمال آسیب‌پذیری است. با توجه به شاخص GUS بیشتر مساحت منطقه از نظر آبشویی در کلاس بینابین قرار دارد. همچنین آفت‌کش‌های Fenvalerate, Linuron و Metsulfuron برای منطقه مطالعاتی مناسب ارزیابی شد.

کلید واژه‌ها: آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، GIS، رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها، برنامه‌ریزی مرکب، باغات انگور

*نویسنده مسئول: Email: mehrdadmirsanjari@yahoo.com

سرآغاز

آب‌های زیرزمینی به عنوان تنها منبع مورد اعتماد مصارف آب شرب و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک هستند (Mirsanjari et al., 2017)، که به عنوان بخش مهمی از آب‌های تجدیدپذیر اکوسیستم به حساب می‌آیند (Mohammadyari et al., 2016). در سال‌های اخیر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی سبب اثرات جبران‌ناپذیری به این منابع از نقطه نظر کمی و کیفی شده است (Mirsanjari et al., 2017). بر این اساس با توجه به محدود بودن منابع آب زیرزمینی و افزایش نیاز آبی جوامع بشری ذخیره این آب‌ها رو به کاهش است (Aghdar et al., 2017; Pourkhabbaz et al., 2017). کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی خطری بزرگ در راه توسعه کشاورزی به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک است (Mohammadyari et al., 2017). بنابراین، نگهداری این منابع ضروری بوده و جلوگیری از آلودگی آنها دارای اهمیت می‌باشد (Mohammadyari et al., 2016). پتانسیل الودگی آب‌های زیرزمینی بر اثر فعالیت‌های انسانی معمولا در سطح یا نزدیک سطح زمین است. بنابراین، باید با سیاست‌های مناسب این منابع را مدیریت کرد (Bordbar et al., 2018). آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از به وجود آمدن آنها در نقاط مختلف در بالاترین سطح آبخوان تعریف می‌شود (Samey & Gang, 2008). آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی بر اساس فعالیت‌های انسانی به دو دسته آسیب‌پذیری ویژه (دخالت فعالیت‌های انسانی) و ذاتی (عدم دخالت فعالیت‌های انسانی) تقسیم می‌شود. افزایش شوری و برداشت غیر مجاز این منابع بر اثر فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد (Neshat & Pradhan, 2017). کاربرد صحیح آفت‌کش‌ها در کشاورزی به طوری که موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی نشود، مستلزم شناخت چگونگی انتقال این آلاینده‌ها به آب زیرزمینی و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از آلودگی آفت‌کش‌هاست (Abrishamchi et al., 2012). استفاده از آفت‌کش‌ها از یک طرف با از بین بردن عوامل ناخواسته سبب افزایش کمی و کیفی محصولات شده و از طرف دیگر با از بین بردن عوامل کنترل‌کننده طبیعی آفات، تعادل زیستی را بر هم زده و موجب طغیان آفات می‌شود (Hassani et al., 2012). هنگامی که آب‌های زیرزمینی آلوده شدند، از بین بردن آلودگی نه تنها مشکل، بلکه هزینه‌بر است. از این‌رو، با توجه به ذخیره منابع آب موجود در جهان و سهم اندک آب‌های زیرزمینی به عنوان منابع آب شیرین قابل استحصال، حفظ کمی وکیفی این منابع گرانبها در حد مطلوب ضروری است. امروز در اغلب کشورهای در حال توسعه کاربرد آفت‌کش‌ها و کنترل شیمیایی نقش اصلی در حفظ نباتات ایفا می‌نماید. شکی نیست که بهره‌گیری از آفت‌کش‌ها نقش به‌سزایی در کنترل آفات گیاهی دارد ولی حتی میزان‌های کم این مواد شیمیایی، پیامدهای محیط‌زیستی و زیان‌های بهداشتی بسیاری برای انسان در پی خواهند داشت. در نتیجه بهره‌گیری بی‌رویه از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی علاوه‌بر آلودگی لایه‌های مختلف خاک، آب‌های زیرزمینی منطقه را نیز در خطر آلودگی قرار می‌دهد. بیشترین نگرانی انسان در ارتباط با خطر آلودگی آفت‌کش‌ها مربوط به ورود آفت‌کش‌ها به آب زیرزمینی است (Alizadeh et al., 2006). سرعت نفوذ و رسیدن آفت‌کش‌ها به آب زیرزمینی بستگی به ویژگی‌های لایه خاکی روی سفره آب، ساختار مولکولی آفت‌کش و مکانیزم جذب و دفع آن توسط خاک دارد. در بسیاری از موارد افراط در استفاده از آفت‌کش‌ها و یا تغییرات آب و هوایی سبب می‌شود که آفت‌کش‌ها مطابق انتظار جذب خاک نشوند و وارد آب زیرزمینی شوند (Dehdarifar & Salehipour, 2014). در آب‌های زیرزمینی و خاک بسیاری از کشورهای جهان به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، آفت‌کش‌های محتوی عناصر نادر وجود دارد. کادمیوم موجود در کودهای شیمیایی فسفاته همراه با کادمیوم موجود در قارچ‌کش‌ها و آرسنیک موجود در آفت‌کش‌ها می‌تواند یک منبع مهم آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی باشد (Pimentel, 1991). به‌طور کلی تحرک و آبشویی علف‌کش‌ها بیش از قارچ‌کش‌ها و حشره‌کش‌هاست و احتمال حضور آنها در آب‌های زیرزمینی بیشتر است (Abasnejad, 2005). افزودن مواد آلی به خاک یک عمل رایج برای افزایش جذب آفت‌کش‌هاست، مواد رسی و مواد آلی موجود در خاک نیز میزان جذب غیریونی آفت‌کش‌ها را بالا می‌برند و با کاهش تحرک آنها در پروفیل خاک، آلودگی منابع آب زیرزمینی را کاهش می‌دهند (Dehdarifar & Salehipour, 2014). کاربرد سموم از یک طرف با از بین بردن عوامل ناخواسته سبب افزایش کمی و کیفی محصولات شده و از طرف دیگر با از بین بردن عوامل

کنترل‌کننده طبیعی آفات، تعادل زیستی را بر هم زده و موجب طغیان آفات می‌شود. همچنین تاثیر سوء سموم بر سایر موجودات مسمومیت‌های ناشی از کاربرد آفت‌کش‌ها در بین افراد و نیز هزینه‌های تولید سموم شیمیایی از مواردی هستند که نیاز به استفاده اصولی و متفکرانه از این مواد را بیشتر نشان می‌دهند. آلودگی آب‌های زیرزمینی تقریبا ناشی از فعالیت‌های انسان است. در مناطقی که تراکم جمعیت زیاد است و انسان از خشکی استفاده می‌کند، آب‌های زیرزمینی خیلی آسیب‌پذیرند. به طور تقریبی هر عملی که موجب تغییرات شیمیایی با هدر رفتن آب باشد، ممکن است روی محیط‌زیست تاثیر بگذارد. اگر چه ممکن است مقادیر سموم مشاهده شده در نمونه‌های آب پایین‌تر از حد استاندارد باشند ولی وجود سموم در نمونه‌های آب تغلیظ شده، خطر نشت سموم به داخل منابع آب شرب منطقه و افزایش غلظت آنها در آینده را به همراه دارد. در واقع قسمت عمده مشکلات مربوط به مبارزه شیمیایی در ارتباط با مصرف بی‌رویه آنها می‌باشد. استفاده از سموم نامناسب، مصرف بی‌موقع آنها و همچنین افزایش دفعات سمپاشی و میزان سم مصرفی از جمله این موارد می‌باشند. در صورتی که یک یا دو سمپاشی به موقع به وسیله یک سم مناسب با دز توصیه شده می‌تواند جوابگوی نیاز کشاورزان باشد. بدیهی است در صورت رعایت این موارد، نه تنها هزینه مبارزه کاهش می‌یابد، بلکه به نحو موثری از اثرات سو آن کاسته می‌شود و چنین رویکردی در مسیر توسعه‌ی پایدار کشاورزی می‌باشد. با توجه به این که در صورت رعایت همه اصول، وارد شدن آفت‌کش‌ها به منابع آب اجتناب ناپذیر است. بنابراین، برای اینکه این منابع مهم سالم بمانند لازم است در صورت آلودگی، منبع آلوده به سرعت شناسایی و روند گسترش آلودگی پیش‌بینی شود و تمهیدات لازم برای پاکسازی و جلوگیری از گسترش آن به عمل آید. در اکثر مواقع، آلودگی آب‌های زیرزمینی آگاهانه و اجتناب ناپذیر انجام می‌گیرد و بنابراین، نمی‌توان عملا تمام منابع آب زیرزمینی را از آلودگی حفاظت نمود. ورود این مواد آلاینده به منابع تامین آب شرب به لحاظ مقاومت شدید در برابر عوامل محیطی، محلول بودن در آب و سمیت برای موجودات زنده، می‌تواند اثرات سوء بر سلامتی انسان و محیط‌زیست داشته باشد. میزان بروز اثرات سوء آنها به کیفیت ماده شیمیایی، مدت زمان استفاده، زمان در معرض قرار گرفتن، غلظت سم ورودی و میزان سمیت آن برای انسان بستگی دارد. از این‌رو، اولین قدم در کنترل و مدیریت باقیمانده سموم موجود در منابع آب، تعیین غلظت آنها با دقت قابل قبول و مقایسه مقادیر به دست آمده با استانداردهای موجود است که همین مساله ضرورت انجام پایش آفت‌کش‌ها در باغات انگور ملایر و آب‌های زیرزمینی متاثر از آنها را ایجاب می‌نماید.

(Ahmadi Dastjerdi & kermani 2017) در پژوهشی به ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی استان تهران به روش دراستیک پرداختند. بر اساس نتایج ۳۳ درصد استان که شامل بخش‌های جنوب و جنوب‌غربی می‌باشد، دارای آسیب‌پذیری بدون خطر و کم خطر است و مناطق شمال و شمال‌شرقی استان دارای بیشترین میزان آسیب‌پذیری می‌باشند. همچنین (Ebrahimi et al., 2018) آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با عنصر نیترات در دشت یاسوج را با استفاده از دو روش تحلیل حساسیت تک پارامتری و تحلیل سلسله مراتبی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بخش وسیعی از مناطق شمالی، مرکزی و جنوبی دشت بسیار آسیب‌پذیر هستند.

(Douglas et al., 2018) نیز توانایی‌های مدل‌های آسیب‌پذیری ذاتی و خاص برای نشان دادن آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به برخی از سموم مشابه را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل AF کارایی بهتر و دقیق‌تری در توزیع تعداد چاه‌های آلوده و همچنین ارزیابی و پیش‌بینی میزان آسیب‌پذیری منطقه دارد. همچنین (Momejian et al., 2019) در پژوهشی به بررسی و مدل‌سازی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های درون‌یابی و مدل ارزیابی آسیب‌پذیری پرداختند. بر اساس نتایج آنها بیان کردند که اگرچه روش‌های تعاملی و مدل‌های آسیب‌پذیر معمول می‌توانند اطلاعات کلی درباره کیفیت آب‌های زیرزمینی را ارایه دهند، اما نمی‌توانند وضعیت آبخوان را از لحاظ فضایی نسبت به مدل‌های درون‌یابی بهتر نشان دهند.

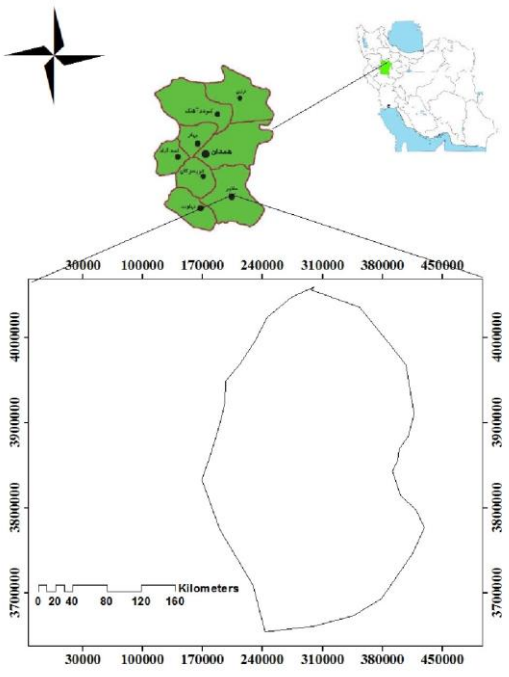
سالانه در شهرستان ملایر ۲۵۰ هزار تن انگور و حدود ۴۰ هزار تن کشمش تولید می‌شود که از این نظر رتبه دوم کشور و رتبه نخست استان همدان را به خود اختصاص داده و بیش از ۱۱ هزار هکتار از اراضی این شهرستان زیر کشت انگور می‌باشد. بر این اساس نوآوری مقاله حاضر استفاده از ۹ آفت‌کش پر کاربرد در منطقه مورد مطالعاتی به منظور آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از آفت‌کش‌ها، در سه سناریو با سه شاخص معتبر و نقشه‌سازی و پهنه‌بندی آنها می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت بین‌المللی منطقه مورد مطالعاتی که اخیرا در فهرست پژوهشکده‌های مهم

جهان در زمینه انگور و کشمش قرار گرفته، تا کنون در این زمینه مطالعه‌ایی صورت نگرفته است که می‌تواند نوآوری دیگر مقاله حاضر باشد.

مواد و روش‌ها

محدوده و قلمرو پژوهش

محدوده مطالعاتی پژوهش حاضر باغات انگور شهر ملایر است که در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی در جنوب دانشگاه ملایر قرار دارد (شکل ۱). جهت آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی از روش همپوشانی، شاخص‌های پایش (شاخص‌های GUS, RF, AF) و ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی استفاده شد. در این مطالعه یک وسعت تقریبی ۱۰۰۰ هکتاری به عنوان محدوده‌ی مطالعاتی انتخاب و از خاک‌های آن نمونه‌برداری شد. جهت نمونه برداری خاک، پس از انتخاب ایستگاه‌های نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری محل نمونه‌برداری در یک پلات ۲۰× ۲۰ سانتی‌متری نمونه‌ها برداشت شد. همچنین قابل ذکر است در هر ایستگاه سه تکرار انجام شد. سپس نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی مخصوص جمع‌آوری و پس از کدگذاری به آزمایشگاه منتقل شدند.



شکل (۱): موقعیت منطقه مطالعاتی

روش تحقیق

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی

آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از آفت‌کش در منطقه مورد مطالعه، در سه سناریو با روش شاخص‌ها ارزیابی می‌شود. در سناریوی اول، از مقادیر و Koc و $t_{1/2}$ متعارف آفت‌کش‌ها استفاده خواهد شد. سپس آسیب‌پذیری در دو سناریوی دیگر آسیب‌پذیری در بدترین شرایط از مشخصات آفت‌کش و آسیب‌پذیری در بهترین شرایط از مشخصات افت‌کش‌ها، ارزیابی خواهند شد (Abrishamchi et al., 2012). منظور از «بدترین و بهترین شرایط از مشخصات آفت‌کش‌ها» این است که مقدار مشخصه‌های آفت‌کش به نحوی تعیین و در روابط محاسبه شاخص‌ها اعمال می‌شوند که به ترتیب آفت‌کش بتواند به راحتی و به سختی آبشویی شود. به منظور ایجاد چنین شرایطی، باید در هر حالت مقادیر خاصی برای پارامترهای Koc و $t_{1/2}$ اختصاص داده شود. مناسب‌ترین شرایط آبشویی در حالتی است که کمترین مقدار جذب آفت‌کش (حداقل Koc) و و کمترین مقدار تجزیه آفت‌کش (حداکثر $t_{1/2}$) وجود داشته باشد و نامناسب‌ترین شرایط آبشویی برعکس است. با اعمال مقادیر Koc و $t_{1/2}$ متناظر با سه سناریوی مذکور برای هر آفت‌کش در فرمول محاسبه شاخص‌ها (فرمول‌های ۱ تا ۳) و به کمک نقشه‌ها و داده‌های پایه، نقشه‌های AF, RF, GUS منطقه در محیط GIS به ترتیب در سه سناریوی متعارف، بدترین و بهترین شرایط از مشخصات هر آفت‌کش تعیین می‌شود (Abrishamchi et al., 2012). همچنین متوسط منطقه‌ای شاخص‌های مزبور برای هر آفت‌کش در سناریوهای مختلف محاسبه می‌شود.

شاخص GUS[1]

این شاخص در سال ۱۹۸۹ توسط Gustafson ارایه شده است که پتانسیل آبشویی شیمیایی آفن‌کس و انتقال به آب‌های زیر زمینی را ارایه می‌کند (Gustafson, 1989). این شاخص فقط اثر پارامترهای جذب و تجزیه را در نظر می‌گیرد و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$GUS=Log_{10}\, t_{1/2} \times[4-\log_{10} K_{oc}] \qquad (۱)$$

که؛ Koc ضریب جذب آفت‌کش توسط کربن آلی خاک بر حسب میلی‌لیتر برگرم و t1/2 زمان نیمه عمر آفت‌کش در محیط خاک بر حسب روز است. شاخص GUS برای نمایش پتانسیل آبشویی آفت‌کش به سه دسته تقسیم می‌شود (جدول ۱).

جدول (۱): ارتباط بین مقدار شاخص GUS و پتانسیل آبشویی آفت‌کش

شرایط	شاخص GUS
غیر قابل آبشویی	<۱/۸
حالت بینابینی	۱/۸ – ۲/۸
آبشویی	> ۲/۸

شاخص RF[۲]

این شاخص که توسط Rao و همکاران در سال ۱۹۸۵ ارایه شده است توانایی آبشویی آفت‌کش بـه خارج از ناحیه غیراشباع را در حالتی که جریان آب کافی برای انتقال آن وجود داشته باشد نشان می‌دهد (Rao et al., 1985; Khan et al., 1989) رابطه (۲).

$$RF = 1 + [\frac{\rho_b f_{oc} K_{oc}}{\theta_{fc}}] \quad (۲)$$

در این رابطه foc جزء جرمی کربن آلی موجود در خاک؛ θfc جزء حجمی رطوبت خاک در حالت ظرفیت زراعی و ρb چگالی توده خاک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است. پارامتر RF برای نمایش پتانسیل آبشویی آفت‌کش به خارج از محیط غیر اشباع به صورت جدول (۲) طبقه‌بندی می‌شود.

جدول (۲): ارتباط بین مقدار شاخص RF و وضعیت آبشویی آفت‌کش

شرایط	فاکتور کندی RF
خیلی متحرک	۱
متحرک	۱-۲
نسبتاً متحرک	۲-۳
نسبتاً نا متحرک	۳-۱۰
خیلی نامتحرک	>۱۰

شاخص AF[۳]

این شاخص نیز توسط Rao و همکاران در سال ۱۹۸۵ ارایه شده است. این شاخص نه تنها پارامتر RF را در خود دارد بلکه فرایند تجزیه آفت‌کش و مشخصات هیدرولوژیک منطقه را نیز در نظر می‌گیرد به همین خاطر باید شاخص AF واقع بینانه‌تر ازRF باشد (Rao et al., 1985). این شاخص به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$AF = exp[\frac{-0.693 dRFK\theta_{oc}}{qt_{1/2}}] \quad (۳)$$

در این رابطه d فاصله سطح آب زیرزمینی تا سطح زمین برحسب متر و q میزان تغذیه خالص آب زیرزمینی برحسب متر بر روز هستند. پارامتر AF برای نمایش امکان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی توسط آفت‌کش‌ها، به صورت جدول (۳) طبقه‌بندی می‌شود.

جدول (۳): ارتباط بین مقدار شاخص AF و آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی

شرایط	فاکتور کاهش (AF)
خیلی نامتحمل	۰-۱۰$^{-۴}$
نامتحمل	۱۰$^{-۴}$-۱۰$^{-۲}$
نسبتاً متحمل	۱۰$^{-۲}$-۱۰$^{-۱}$
متحمل	۱۰$^{-۱}$-۲۱۰$^{-۱}$
خیلی متحمل	۲۱۰$^{-۱}$-۱

رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها به روش برنامه‌ریزی مرکب

در تحقیق حاضر آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از هر آفت‌کش توسط سه شاخص حرکت (AF, RF ,GUS) در سه سناریوی مختلف ارزیابی می‌شود. بنابراین، ارزیابی و رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها، یک تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شود. برنامه‌ریزی مرکب یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، مبتنی بر فاصله است. در این روش، بهترین تصمیم یا گزینه، گزینه‌ای است که حداقل فاصله را با گزینه ایده‌آل داشته باشد (UNESCO, 1987). در این روش، ارزیابی و رتبه‌بندی آفتکش‌ها به صورت زیر انجام می‌شود:

الف: شاخص‌های پایه (AF, RF ,GUS) برای آفتکش‌ا انتخاب و مقدار آن برای هر آفتکش تعیین می‌شود.

ب: شاخص‌های پایه طبق رابطه (۴) نرمال‌سازی شد:

$$S_i = \frac{Z_{i+} - Z_i}{Z_{i+} - Z_{i-}}] \quad (۴)$$

که؛ i شماره شاخص پایه، Zi مقدار واقعی شاخص پایه i، Zi+ و Zi- به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر ممکن شاخص پایه i و Si مقدار نرمال شده شاخص پایه i است.

ج. مقادیر نرمال شده Si (به دست آمده از مرحله قبلی) بر حسب

ماهیت شاخص‌های پایه به چند گروه تقسیم می‌شوند، در واقع این گروه‌ها را، گروه‌های سطح دوم شاخص‌های پایه نامیده می‌شوند. اصولاً گروه های سطح دوم AF, GUS و RF و شاخص‌های پایه هر گروه، همان شاخص‌های حرکت در سه سناریوی مختلف است. بنابراین، بر این اساس فاصله مرکب گروه‌های سطح دو به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_j = [\sum_{i=1}^{n_j} \alpha_{ij} S_{ij}^{P_j}]^{1/P_j} \quad (۵)$$

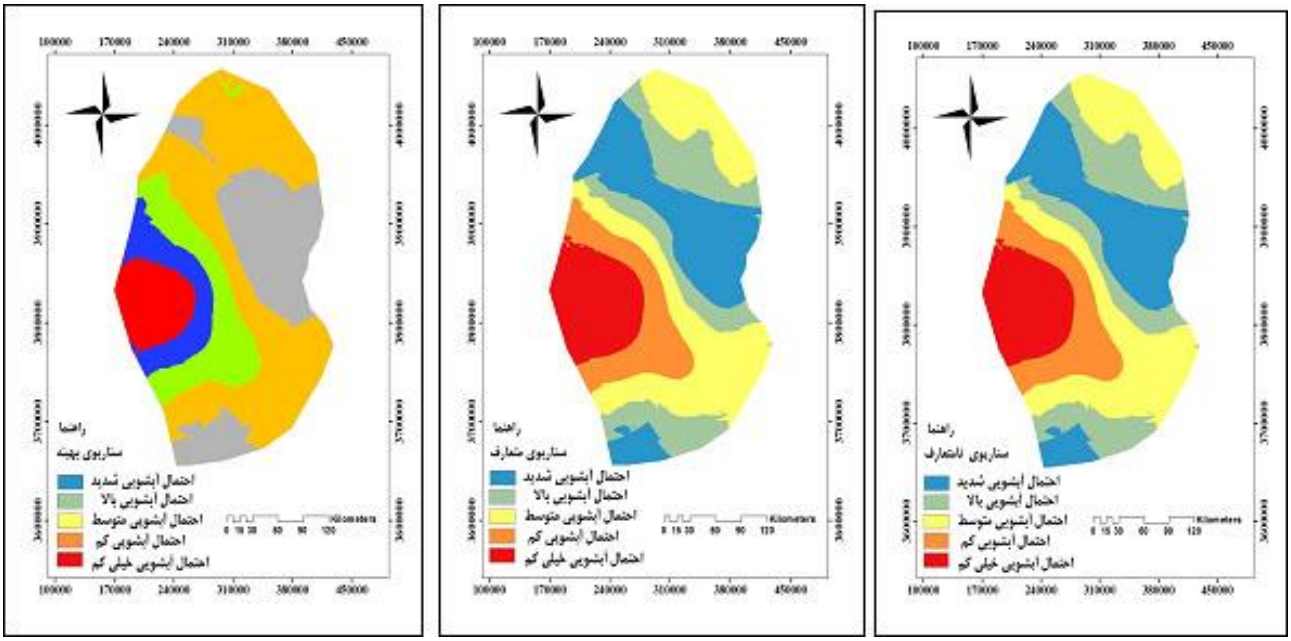
در این رابطه Sij مقدار نرمال شده شاخص پایه iام از گروه jام، Lj فاصله مرکب گروه jام در سطح دوم شاخص‌های پایه، nj تعداد شاخص‌های پایه موجود در گروه j ام و αij وزن‌های بیان‌کننده اهمیت نسبی هر کدام از شاخص‌های پایه گروه jام ($\sum \alpha ij=1$) که مقادیر α نیر باید برحسب اهمیت هر کدام از شاخص‌ها تعیین می‌شود و Pj فاکتور متعادل‌کننده گروه jام است. مقادیر Pj معمولا می‌تواند اعداد ۱ یا ۲ انتخاب شود (Abrishamchi et al., 2012). آفتکش‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل ۹ مورد از آفت‌کش‌های هستند که بیشترین مصرف را در منطقه مطالعاتی دارند. این آفت‌کش‌ها شامل: Malathion, Dursban Or Diazinon, Chlorpyrifos, Confidor Or Imidacloprid, Dimethoate, Linuron, Fenvalerate, Metsulfuron, & Propargite می‌باشند.

اطلاعات مربوط به آمار و میزان مصرف سموم مصرفی در مزارع با مراجع به اداره کشاورزی شهرستان ملایر جمع‌آوری شد. برای تعین بافت خاک، هدایت الکتریکی، میزان رطوبت، و مواد آلی خاک از روش‌های استاندارد متد استفاده شد. همچنین حدود ۵۰ نمونه جهت سنجش مواد آلی، بافت خاک و رطوبت خاک از نقاط مختلف منطقه به روش نمونه‌برداری تصادفی به طوری که تمام منطقه را پوشش دهد، برداشت شد.

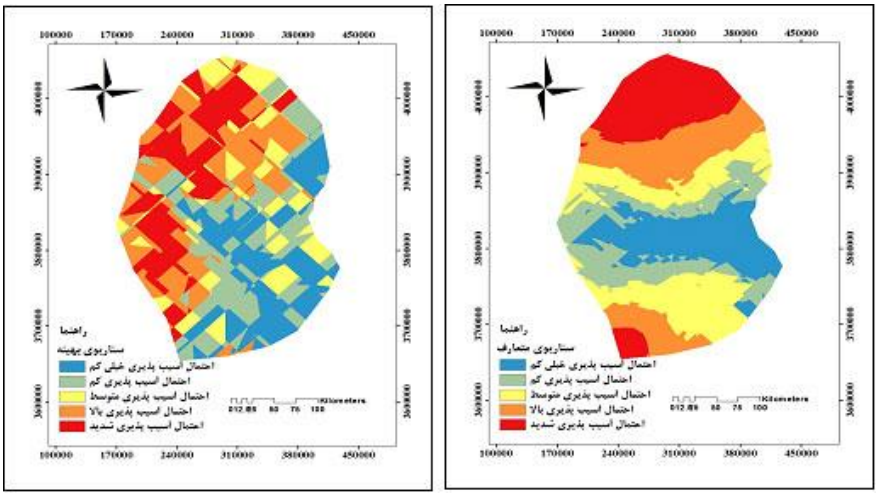
یافته‌ها

نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های AF و RF برای تمام آفت‌کش‌های مورد مطالعه در سه سناریو با استفاده از فرمول‌های (۱ تا ۳) تهیه شد. لازم به ذکر است که شاخص GUS برای تمام منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های (۲ و ۳) نقشه‌های آفت‌کش Linuron را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. با توجه به این که مقدار این آفت‌کش برای شاخص AF در سناریوی نامتعارف برای تمام نقاط مورد نمونه‌برداری صفر به دست آمد، فاقد نقشه می‌باشد.

با توجه به شکل‌ها می‌توان گفت که مناطق زیادی وجود دارند که نقشه‌های آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص‌ها در یکی از سناریوها عدم آبشویی و آسیب‌رسانی آفت‌کش به آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد که حاکی از این



شکل (۲): نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی آفت‌کش Linuron (شاخص RF)



شکل (۳): نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی آفت‌کش Linuron (شاخص AF)

است که آفت‌کش در مناطق موردنظر به آب‌های زیرزمینی آبشویی نمی‌شود در حالی که همان منطقه مشابه در سناریویی دیگر، آبشویی آفت‌کش مصرفی را نشان می‌دهد. جدول (۴) نتایج مقدار متوسط منطقه‌ای هر سه شاخص در سناریوهای مختلف (سناریوی A: آسیب‌پذیری در شرایط متعارف؛ سناریوی B: آسیب‌پذیری در شرایط نامتعارف؛ سناریوی C: آسیب‌پذیری در شرایط بهینه) برای آفت‌کش‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. همچنین نتایج رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها با روش برنامه‌ریزی مرکب با توجه به روابط (۴) و توسط نمودار (Rao & Hornsby, 1989) محاسبه شد (جدول ۵ و ۶).

بهترین شرایط (روز):

Koc= 10000 (mL/g), t1/2: ۳/۱۶

بدترین شرایط (روز):

Koc= 1 (mL/g), t1/2: ۳/۱۶

در صورتی که مشخصات یک آفت‌کش خارج از محدوده‌های فوق باشد بر حسب این که از بهترین شرایط یا بدترین شرایط فراتر رفته باشد به ترتیب آفت‌کش بسیار مناسب یا نامناسب در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از مقادیر Koc و t1/2 مقدار متوسط منطقه‌ای شاخص‌های AF, GUS و RF در شرایط ایده‌آل و ضد ایده‌آل محاسبه شدند که این مقادیر با استفاده از رابطه (۴) به دست آمدند. سپس با استفاده از این مقادیر و مقدار شاخص‌ها، مقدار نرمال شده هر کدام از شاخص‌ها در سناریوی‌های تعریف شده به دست آمد.

جدول (٤): مقدار متوسط منطقه‌ای شاخص‌های GUS, AF و RF در سناریوهای مختلف برای آفت‌کش‌ها

	فاکتور کاهش (AF)			شاخص GUS		فاکتور کندی (RF)		
	A	B	C	B	C	A	B	C
Diazinon	۰	۰/۹۳	۰	۴/۱۹	۰/۹۷	۱/۷۹	۰/۷۹	۶/۸۰
Malathion	۰	۰	۰	۰/۴۱	۰	۰/۸۲	۰/۷۹	۶/۸۳
Dursban Or Chlorpyrifos	۰	۰/۵	۰	۰/۴۸	۰/۱۳	۶/۵۵	۳/۸۱	۱۳/۱۲
Confidor Or Imidacloprid	۴/۸۷	۰/۵	۰	۴/۶۰	۳/۵۱	۵/۴۷	۳/۸۸	۵۹/۱۱
Dimethoate	۰	۰/۹۰	۰	۳/۸۰	۲/۲۹	۸/۸	۳/۸۷	۲۶/۷۹
Linuron	۰/۱۴۱۴	۰/۴۳	۰	۴/۷۲	۲/۵۷	۲۴/۱۴	۱۱/۸۱	۴۹/۵۳
Fenvalerate	۰/۰۰۰۳	۰/۹۴	۰	۰/۶۶	۰/۱۷	۲۱	۱۱	۶۹
Metsulfuron	۰/۰۰۰۳	۰/۰۳۴	۳	۹/۰۲	۲/۵۳	۲۵	۳/۴۳	۴۸
Propargite	۰	۰/۰۳	۰	۳/۶۶	۰/۹۲	۱۶	۹/۱	۳۱

شاخص‌های پایه که با سه سناریوی مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است بر اساس فرمول (۵) به فاصله مرکب تبدیل شدند

(جدول ۵). مقدار α به ترتیب برای سناریوهای بهترین شرایط، متعارف و نامتعارف ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۰/۲۵ و مقدار P، ۲ در نظر گرفته شد.

جدول (۵): فاصله مرکب (Lj) برای سه گروه AF، GUS و RF

	L_1 (گروه AF)	L_2 (گروه GUS)	L_3 (گروه RF)
Diazinon	۰/۴۷	۲/۴۳	۳/۶۵
Malathion	۰	۰/۲۹	۳/۶۲
Dursban	۰/۲۵	۰/۳۳۶	۱۱/۵۱
Confidor	۳/۴۵	۳/۷۷	۳۰/۶۱
Dimethoate	۰/۴۵	۲/۹۸	۱۸/۳۹
Linuron	۰/۲۴	۳/۰۴۷	۴۲/۵۹
Fenvalerate	۱/۵۷	۰/۴۵۶	۴۵/۸۳
Metsulfuron	۰/۲۲	۵/۳۴	۴۳/۰۴
Propargite	۰/۰۲	۲/۰۶	۲۷/۸۰

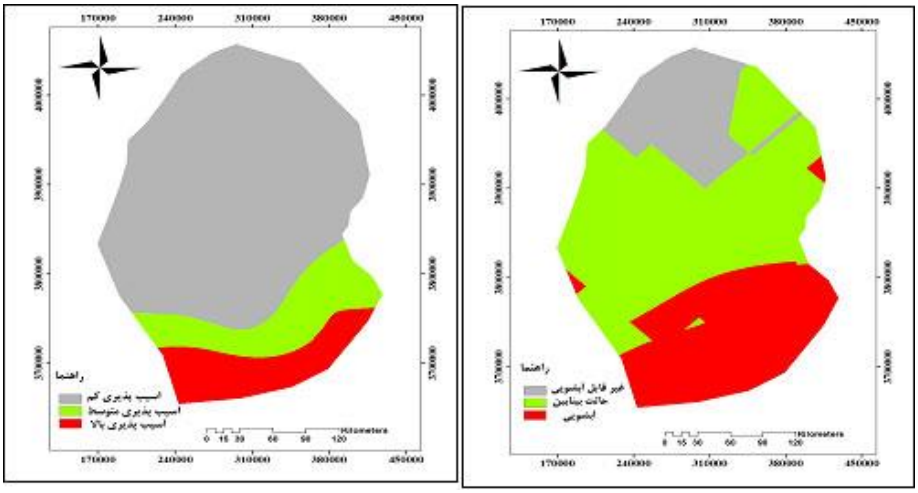
سپس با استفاده از فرمول (۶) مقدار L به دست آمد. این مقدار حاصل ترکیب L۱، L۲ و L۳ می‌باشد که به ترتیب مربوط به گروه‌های AF, GUS و RF می‌باشند (جدول ۶).

جدول (٦): فاصله مرکب (L) به ازای مقادیر مختلف α1 تا α۳

آفت‌کش	α_1 = ۰/۶۶۶ α_2 = ۰/۳۳۳	α_1 = ۰/۴۴۴ α_2 = ۰/۳۳۳ α_3 = ۰/۲۲۲	α_1 = ۰/۱۴۳ α_2 = ۰/۲۸۶ α_3 = ۰/۵۷۱	α_1 = ۰/۲۵ α_2 = ۰/۲۵ α_3 = ۰/۵	α_1 = ۰/۵۷۱ α_2 = ۰/۱۴۳ α_3 = ۰/۲۸۶	α_1 = ۰/۲۲۲ α_2 = ۰/۴۴۴ α_3 = ۰/۳۳۳
Diazinon	۰/۷۶	۰/۷۴	۱/۱۷	۰/۸۸	۱/۲۸	۱/۰۲
Malathion	۰/۶	۰/۳۰	۰/۸۵	۰/۴۹	۱/۰۶	۰/۴۷
Dursban	۲	۰/۹۴	۲/۶۴	۱/۵۴	۳/۳۵	۱/۳۹
Confidor	۶/۲۵	۳/۷۱	۷/۸۱	۵/۱۶	۹/۵۰	۴/۸۱
Dimethoate	۳/۲۱	۱/۸۷	۴/۶۳	۲/۷۸	۳/۵۳	۲/۷۸
Linuron	۷/۱۷	۳/۵۵	۹/۹۹	۵/۷۶	۱۲/۴۱	۵/۴۴
Fenvalerate	۸/۱۶	۳/۷۹	۱۰/۴۳	۶/۱۸	۱۳/۳۵	۵/۴۵
Metsulfuron	۷/۲۳	۳/۹۰	۱۰/۴۷	۶/۱۰	۱۲/۷۰	۶/۰۰
Propargite	۷/۲۲	۳/۹۵	۷/۲۲	۴/۱۳	۹/۰۰	۳/۹۰

در پایان با استفاده از جدول (۶)، رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها انجام شد (جدول ۷).

با توجه به نتایج جدول (۴) می‌توان گفت که رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها با استفاده از دو شاخص AF و GUS در سناریوها تشابه زیادی با هم دارند. دلیل تفاوت نتایج شاخص RF با دو شاخص دیگر این است که در شاخص RF فقط فرآیند جذب در نظر گرفته می‌شود در صورتی که در دو شاخص دیگر علاوه بر جذب فرآیند تجزیه هم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که نتایج شاخص‌های AF و GUS نسبت با شاخص RF قابل اعتمادتر می‌باشد که این نتیجه با نتایج مطالعه (Abrishamchi et al., 2012; Jozef, 2003) مطابقت دارد. در واقع می‌توان گفت که استفاده از شاخص RF در زمانی که داده‌های تجزیه آفت‌کش موجود نیست، مناسب می‌باشد (Khan & Liang, 1989). شکل (۴) نقشه‌های پهنه‌بندی دو شاخص AF و GUS را نشان می‌دهد. این شکل‌ها با توجه به مقادیر متوسط منطقه‌ای به دست آمدند.



شکل (٤): نقشه‌های پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی (راست: شاخص GUS؛ چپ: شاخص AF)

همچنین با توجه به جدول (۷) می‌توان گفت که آفت‌کش Fenvalerate در بین ۹ آفت‌کش مورد بررسی کمترین آسیب‌پذیری را برای آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه دارد.

جدول (۷): رتبه‌بندی آفت‌کش‌ها با استفاده از نتایج روش برنامه‌ریزی مرکب

آفت کش	رتبه
Diazinon	۸
Malathion	۹
Dursban Or Chlorpyrifos	۷
Confidor Or Imidacloprid	۴
Dimethoate	۶
Linuron	۳
Fenvalerate	۱
Metsulfuron	۲
Propargite	۵

آفت‌کش‌های Metsulfuron و Linuron نیز پس از آفت‌کش Fenvalerate به ترتیب کمترین خطرات را برای آب‌های زیرزمینی منطقه دارند. همچنین آفت‌کش Malathion بیشترین آسیب‌پذیری را در بین آفت‌کش‌های مورد بررسی دارد. با توجه به شکل (۴) می‌توان گفت که احتمال آسیب‌پذیری در قسمت‌های شمالی منطقه مورد مطالعه کم و قسمت جنوبی منطقه دارای بیشترین احتمال آسیب‌پذیری است. همچنین با توجه به شاخص GUS بیشتر مساحت منطقه از نظر آبشویی در کلاس بینابین قرار دارد. بر اساس این شاخص نیز در قسمت‌های جنوبی منطقه آبشویی زیاد است. با استفاده از مقادیر جدول (۴) برای این دو شاخص و با توجه به جدول‌های (۱ و ۳) می‌توان ارزیابی آفت‌کش‌ها را انجام داد. بر این اساس در صورتی که یک آفت‌کش در هیچ سناریوی بدترین شرایط (آبشویی یا تراوش) هشداردهنده نباشد، آن آفت‌کش مناسب تشخیص داده می‌شود. همچنین اگر آفت‌کشی در سناریوی بهینه و متعارف آبشویی داشته، آن آفت‌کش نامناسب و در غیر این صورت متوسط تشخیص داده می‌شود (جدول ۸). این جدول برگرفته از مطالعه (Abrishamchi et al., 2012) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

آلودگی منابع آب به وسیله سموم آفت‌کش یکی از مهمترین عوامل بازدارنده در خصوص توسعه‌ی کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. از آنجا که در شهرستان ملایر زمین‌های کشاورزی و باغ‌های زیادی وجود دارد، که به صورت دوره‌ای سمپاشی می‌شوند و همچنین به دلیل این که آب شرب اهالی منطقه بیشتر از آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود، احتمال نشت سموم به داخل این چاه‌ها وجود دارد. به همین لحاظ مصرف سموم آفت‌کش می‌تواند تهدیدی برای منابع تامین آب شرب شهرستان محسوب شود. برای این که این منابع مهم سالم بمانند لازم است در صورت آلودگی منبع آلوده به سرعت شناسایی شود. بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی تاثیر کلیدی در حفاظت و بهره‌برداری صحیح از این منابع استراتژیک دارد. با

توجه به نقشه‌های نهایی تعیین آسیب‌پذیری، می‌توان گفت که قسمت‌های جنوبی آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به سایر قسمت‌های منطقه دارد. همچنین نتایج ارزیابی آفت‌کش‌ها حاکی از این است که آفت‌کش‌های Fenvalerate, Linuron و Metsulfuron برای منطقه مطالعاتی مناسب و آفت‌کش‌های Diazinon, Malathion و Dursban Or Chlorpyrifos نامناسب هستند. بر این اساس نتایج مطالعه حاضر با معرفی آفت‌کش‌های با حداقل آسیب‌گذاری بر منابع آب‌های زیرزمینی منطقه، می‌تواند به مدیریت بهتر منابع آبی کمک کند.

جدول (۸): ارزیابی آفت‌کش‌ها با توجه به مقادیر شاخص‌های AFوGUS در سناریوهای تعریف شده

	AF			GUS		ارزیابی آفت‌کش
	A	B	C	A	B	C
Diazinon	vu	l	vu	nl	l	بد
Malathion	vu	vu	vu	nl	nl	بد
Dursban Or Chlorpyrifos	vu	l	vu	nl	nl	بد
Confidor Or Imidacloprid	l	l	vu	l	l	متوسط
Dimethoate	vu	l	vu	t	l	متوسط
Linuron	l	l	vu	t	l	خوب
Fenvalerate	u	l	vu	nl	nl	خوب
Metsulfuron	u	l	l	l	t	خوب
Propargite	vu	l	vu	nl	l	متوسط

nl: non leacher (عدم وجود تراوش)؛ l: leacher (وجود تراوش)؛ t: transitional (حالت بینابینی)؛ vu: very unlikely (خیلی غیر محتمل) unlikely u : (غیر محتمل)؛ ml moderately likely : (نسبتا محتمل)؛ L : likely (محتمل) (سناریوی A: آسیب‌پذیری در شرایط متعارف؛ سناریوی B: آسیب‌پذیری در شرایط نامتعارف؛ سناریوی C: آسیب‌پذیری در شرایط بهینه

یادداشت‌ها

1. Groundwater Ubiquity Score
2. Retardation Factor
3. Attenuation Factor

فهرست منابع

Abrishamchi, A.; Taheri Shahraeen, H. & Tajrishi, M. 2012. The vulnerability of groundwater from pesticides and their ranking and categorization. Water and Wastewater, 3: 16-27. (In Persian)

Aghdar, H.; Mohammadyari, F. & Bigmohammadi, F. 2017. Using of Decision-Making Model FAHP Buckley in Assessment and zoning of groundwater quality for drinking and agricultural Nine Cities ilam . Environmental Researches, 8 (15): 113-122. (In Persian)

Ahmadi Dastjerdi, M. & kermani, F. 2017. Groundwater Vulnerability Assessment of Tehran Province by DRASTIC Method. 4th International Conference on Environmental Planning and Management, Tehran, Faculty of Environment, University of Tehran. (In Persian)

Alizadeh, A. 2006. Principles of Applied Hydrology. Imam Reza University Press. (In Persian)

Bordbar, M.; Neshat, A.R. & Javadi, S. 2018. Assessment of vulnerability of Abkhoun coastal area of Ghareh Sou Gorganroud using GALDIT and SCATNIS method and optimize it with SPSA and GIS tools. Ecohydrology, 5 (2): 699-711. (In Persian)

Dehdarifar, M. & Salehipour, F. 2014. The effect of pesticides on the quality of surface and ground water. First

National Conference on Agricultural Pollutants and Food Health, Challenges and Solutions, Ahvaz. Pp. 614-618. (In Persian)

Douglas, S. H.; Dixon, B. & Griffin, D. 2018. Assessing intrinsic and specific vulnerability models ability to indicate groundwater vulnerability to groups of similar pesticides: a comparative study. Physical Geography, 1-19.

Ebrahimi, H.; Neshat, A.R.; Javadi, S. & Aghamohammadi, H. 2018. DRASTIC method correction in groundwater vulnerability using SPSA and AHP methods. Ecohydrology, 5 (4):1191-1202. (In Persian).

Gustafson, D. I. 1989. Groundwater ubiquity score-a simple method for assessing pesticide leach ability. Environ. Toxicol Chem, 8: 339-357

Hassani, A.H.; Sayadi, M. & Jafari, S. 2012. Investigating the Effect of Agricultural Pesticides on the Quality of Drinking Wells in Shemiranat Villages. Water and Wastewater, 1, pp. 119-129. (In Persian)

Jozef, M. 2003. Laboratory methods of estimating the retardation factor of migrating mineral nitrogen compounds in shallow groundwater. Geol. Quart. 47 (1): 91–96.

Khan, M. A. & Liang, T. 1989. Mapping pesticide contamination potential. Environmental Management, 13 (2): 233-242.

Mirsanjari, M.M.; Mohammadyari, F.; Basiri, R. & Hamidi pour, F. 2017. Modeling quality parameters EC, SAR and TDS in groundwater using artificial neural network (case study: Mehran Plain and DEHLORAN). Journal of Human and Environment, 42: 1-12. (In Persian)

Mohammadyari, F.; Tavakoli, M. & Aghdar, H. 2016. Assessment and zoning of groundwater quality in agricultural areas of Mehran and Dehloran With geostatistical methods. Journal of Irrigation Sciences and Engineering. 39 (4): 71-83. (In Persian)

Mohammadyari, F.; Aghdar, H. & Basiri, R. 2017. Zoning groundwater quality for drinking using geostatistical methods(Case Study: Arid Regions MEHRAN and DEHLORAN). Scientific- Research Quarterly of Geographical Data, 101 (26): 199-208. (In Persian)

Momejian, N.; Najm, M. A.; Alameddine, I. & El-Fadel, M. 2019. Groundwater Vulnerability Modeling to Assess Seawater Intrusion: a Methodological Comparison with Geospatial Interpolation. Water Resources Management, 1-14

Neshat, A. & Pradhan, B. 2017. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. Arabian Journal of Geosciences. 10(22): 501-519

Pourkhabbaz, H.; Aghdar, H. & Mohammadyari, F. 2017. Zoning groundwater quality for agriculture by classification WILCOX index (Case study: Qazvin plain). Geographic space, 58 (17): 111-129. (In Persian)

Rao, P. S. C. & Hornsby, A. G. 1989. Behavior of pesticides in soils and water, Institute of Food and

Agricultural Sciences, University of Florida, Soil Science Fact Sheet, SL-40.

Rao, P. S. C.; Hornsby, A. G. & Jessup, R. E. 1985. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. Proc., Soil Crop Sci. Soc., Florida 44, pp. 1-8.

Samey A.A. & Gang, C. A. 2008. GIS based DRASTIC Model for the assessment of groundwater vulnerability to pollution in West Mitidja: Blida City, Algeria. J Appl Sci. 3(7): 500–507.

UNESCO, 1987. Methodological guidelines for the integrated environmental evaluation of water resources development, UNEP/UNESCO Project FP/5201-85-01, Paris