

تغییرات مکانی و پهنه‌بندی نترات و فسفات آب زیرزمینی شهرکرد طی یک دوره پنج ساله

الهام فتحی هفشجانی و حبیب‌الله بیگی هرچگانی*

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۸/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۳/۲۴)

چکیده

روند آلودگی نترات و فسفات آب زیرزمینی می‌تواند حاکی از نحوه مدیریت آب این منابع باشد. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات در غلظت نترات و فسفات و الگوهای مکانی توزیع نترات و فسفات آبخوان شهرکرد در طی یک دوره پنج ساله است. به این منظور از ۱۰۰ حلقه چاه کشاورزی در طی سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ نمونه‌برداری و غلظت نترات و فسفات اندازه‌گیری شد. از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ میانگین غلظت نترات آبخوان از ۱۸ به ۲۷ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت فسفات از ۰/۰۵ به ۰/۱۵ میلی‌گرم بر لیتر افزایش پیدا کرده است. از بین مدل‌های مختلف واریوگرام گوسی، نمایی، کروی و خطی، مدل کروی تغییرات مکانی نترات و فسفات در طی دوره مورد مطالعه را بهتر توجیه کرد. بررسی نقشه‌ها نشان داد که غلظت نترات و فسفات در بخش‌های جنوبی دشت حداکثر و در بخش‌های شمالی حداقل است. به نظر می‌رسد دلیل اصلی بالا بودن غلظت نترات و فسفات در بخش جنوبی وجود تصفیه‌خانه شهرکرد، دامداری‌های فشرده، کم عمق بودن سطح ایستابی و جهت‌گرایان هیدرولیکی به این سمت از دشت باشد. مقایسه نقشه‌ها نشان داد که از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ از مساحت کلاس‌های با آلودگی کمتر کاسته شده و به مساحت کلاس‌های با غلظت بیشتر نترات و فسفات افزوده شده است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، کریجینگ، آلودگی، واریوگرام

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: beigi.habib@gmail.com

مقدمه

منابع آب زیرزمینی ایران مهم‌ترین منابع آب مورد استفاده در کشاورزی و شرب به شمار می‌آیند (۵). پژوهشگران عوامل مختلفی را به‌عنوان منبع آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات و فسفات شناسایی کرده‌اند. در این میان فعالیت‌های کشاورزی و دامداری، کودپاشی و آبیاری (به‌ویژه آبیاری با پساب) و نیز ورود پساب‌های فاضلاب و صنعتی مهم‌ترین عوامل افزایش غلظت نیترات و فسفات در آبخوان شهرکرد معرفی شده‌اند. افزایش نیترات بیش از ۴۵ میلی‌گرم در لیتر در آب شرب سبب بیماری متهموگلوبینمیا (Methemoglobinemia) در نوزادان و همچنین بروز سرطان در افراد بالغ می‌گردد (۹). گرچه وجود فسفات در آب زیرزمینی مشکل بهداشتی شناخته شده‌ای را به وجود نمی‌آورد، ولی با استحصال آب زیرزمینی و ذخیره آن در سطح ممکن است مشکلاتی در ظاهر، بو و مزه آب پدید آید و در این صورت هزینه تصفیه آب بالا می‌رود (۱۷). اداره بهداشت ملی کانادا حداکثر مجاز فسفات را ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر (۲۰)، جامعه اقتصادی اروپا آن را ۰/۵۴ میلی‌گرم بر لیتر (۲۰) و اداره حفاظت محیط زیست آمریکا نیز حد مجاز فسفات را ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر تعیین کرده‌اند (۲۳).

کیفیت آب زیرزمینی با گذشت زمان تغییر می‌کند. این تغییر می‌تواند در مقیاس‌های مختلف زمانی (ماهانه، فصلی، دوره‌های چند ساله) رخ دهد. این تغییرات در پاسخ به عملیات مدیریتی حوضه آبخوان و فعالیت‌های انسانی در سطح حوضه آبخوان است. تغییرات می‌تواند به سوی کیفیت پایین‌تر و یا رفع آلودگی و حرکت به سوی کیفیت بالاتر صورت گیرد. مطالعه کیفیت آب زیرزمینی در طی یک دوره چند ساله می‌تواند عکس‌العمل آبخوان در مقابل مدیریت فصلی و روند فعلی تغییرات کیفیت را منعکس کند.

تعدادی از مطالعات، تغییرات زمانی کیفیت آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار داده‌اند. مثلاً ناس و برکتای (۱۸) در منطقه قونیه ترکیه غلظت نیترات آب زیرزمینی این منطقه را با وسعت ۴۲۷/۵ کیلومتر مربع در ۱۳۹ نمونه در سال ۱۹۹۸ و در ۱۵۶

نمونه آب در سال ۲۰۰۱ اندازه‌گیری کردند (۱۸). براساس نقشه‌های تولید شده، غلظت نیترات در مرکز شهر رو به افزایش داشته و میانگین آن از ۲/۲ در سال ۱۹۹۸ به ۱۶/۱ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۲۰۰۱ رسید.

با گذشت زمان ممکن است افزایش یا کاهش مساحت پهنه‌های مربوط به کلاس‌های آلودگی رخ می‌دهد. چن و همکاران اثرات تغییرات کاربری اراضی و منابع آب آبیاری را بر آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی کم‌عمق استان هیوانتای در شمال چین بررسی کردند (۱۴). در این تحقیق از ۳۹۴ حلقه چاه آبیاری در طول یک دوره ۵ ساله از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ نمونه‌برداری شد. پهنه‌بندی نشان داد که در طی این دوره درصد مساحت مربوط به کلاس‌های ۱۵-۱۰، ۲۰-۱۵، ۳۰-۲۰ و بیشتر از ۳۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش پیدا کرده است. این افزایش‌ها به ازای کاهش پهنه‌های مربوط به ۵-۰ و ۱۰-۵ میلی‌گرم در لیتر رخ داد (۱۴).

کیفیت یک منبع آب زیرزمینی ممکن است از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت باشد. شناخت این تغییرات مکانی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت دقیق امری لازم و مفید است. از آنجا که آمار کلاسیک قادر به در نظر گرفتن توزیع مکانی مؤلفه‌های کیفیت آب‌های زیرزمینی نیست، از زمین آمار به‌عنوان تکنیکی برای این هدف استفاده می‌گردد (۱۱). فلیپو و همکاران (۲۰۰۷) در آبخوان گرند مارین در فرانسه، به وسعت ۲۷۰۰ کیلومتر مربع، با نمونه‌برداری از ۲۴۳ حلقه چاه نشان دادند که میانگین غلظت نیترات در آبخوان به اندازه ۰/۰۹ میلی‌گرم در لیتر در بین سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۸۸ افزایش پیدا کرده است. مدل واریوگرام کروی با دامنه تأثیر ۲۰۰۰۰ متر بهترین برازش را برای غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی داشت (۱۶). اویان و کی (۲۴) برای پهنه‌بندی غلظت نیترات آب زیرزمینی شهر قونیه واقع در ترکیه از روش کریجینگ استفاده کردند. در این تحقیق، داده‌های غلظت نیترات آب زیرزمینی از یک توزیع لوگ‌نرمال و مدل واریوگرام کروی پیروی کرده و دارای وابستگی مکانی متوسطی (۰/۶۰) بودند. دامنه تأثیر، سقف و اثر

تغییرات غلظت نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد، (۲) بررسی تغییرات در الگوهای مکانی توزیع نیترات و فسفات آبخوان شهرکرد و (۳) بررسی تغییرات در پهنه‌بندی غلظت نیترات و فسفات در طی یک دوره پنج ساله با استفاده از روش کریجینگ معمولی است.

مواد و روش‌ها

آبخوان مورد نظر در دشت شهرکرد واقع شده است. دشت شهرکرد با امتداد شمال غرب - جنوب شرق در بین $32^{\circ}07'$ تا $35^{\circ}32'$ عرض شمالی و $50^{\circ}38'$ تا $51^{\circ}10'$ طول شرقی قرار دارد. بزرگ‌ترین آبادی این دشت، شهرکرد با ارتفاع حدود 2060 متر از سطح دریا در بخش شمال دشت قرار دارد. سطح حوزه آبریز این دشت بالغ بر $1135/6$ کیلومترمربع است (۸). نقشه موقعیت دشت شهرکرد و برخی نقاط مهم در دشت شهرکرد در شکل ۱ ارائه شده است.

آبخوان دشت شهرکرد از لحاظ تأمین آب کشاورزی و آب شرب منطقه دارای اهمیت زیادی می‌باشد. مساحت این آبخوان بالغ بر 55100 هکتار است. مهم‌ترین ورودی به این آبخوان نفوذ از طریق بارندگی و مهم‌ترین خروجی برداشت آب از طریق چاه‌های کشاورزی است. مهم‌ترین فعالیت انسانی موجود در منطقه کشاورزی، دامداری، و تا حدودی صنعت است (۸). نقشه کاربری اراضی دشت شهرکرد (۸) و چاه‌های نمونه‌برداری شده از دشت شهرکرد در شکل ۲ نشان داده شده است.

۱. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

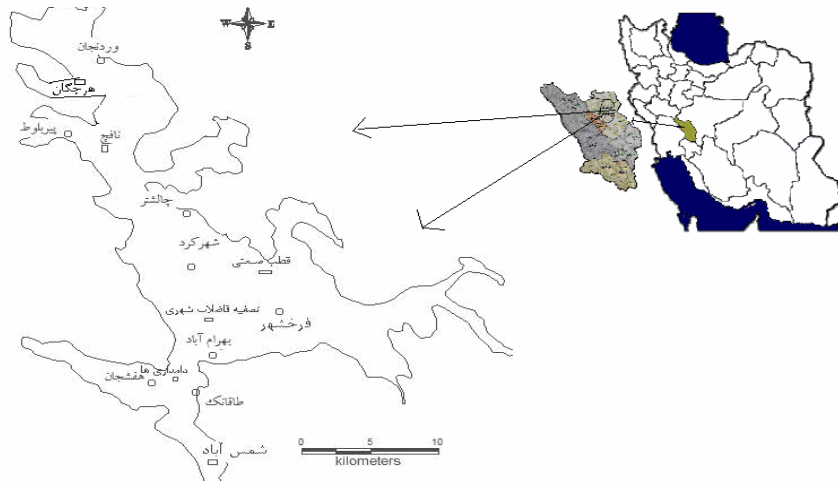
در این مقاله اطلاعات مربوط به نمونه‌برداری در سال‌های 1385 ، 1389 و 1390 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمونه‌برداری سال 1385 از 15 تا 30 تیر سال 1385 ، نمونه‌برداری سال 1389 با سه بار تکرار در تیر، شهریور و آبان صورت گرفت و سپس از این سه نوبت میانگین گرفته شد، و نمونه‌برداری سال 1390 در خرداد صورت گرفت. مدت زمان نمونه‌گیری سال 1389 و سال 1390 در هر نوبت در 3 الی 4

قطعه‌ای نیز به ترتیب 20 و 12 و 0 متر، 20 و 12 و 0 شد. هم‌چنین براساس نقشه توزیع مکانی آلودگی نیترات در آب زیرزمینی بیشترین غلظت نیترات در مرکز شهر احتمالاً به دلیل وجود مراکز صنعتی بود (۲۴).

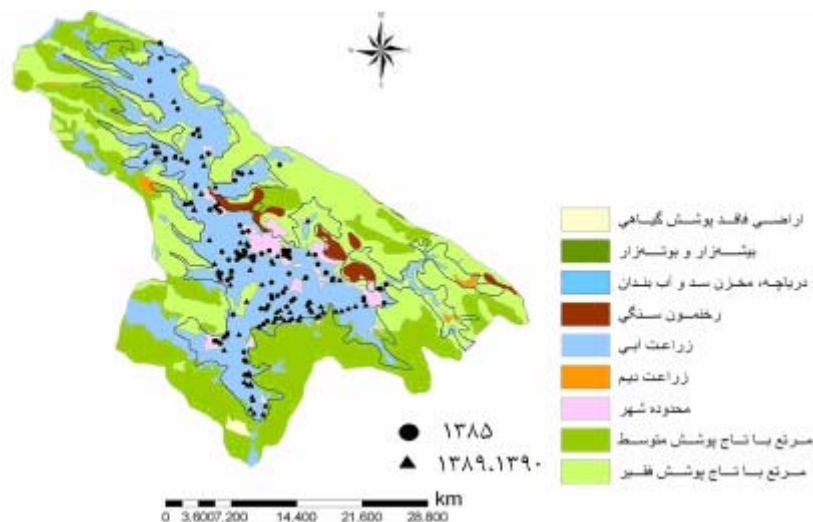
در آبخوان‌های مختلف از مدل‌های مختلف واریوگرام برای توصیف الگوی تغییرات مکانی شاخص‌های کیفی و نیترات استفاده شده است و به نظر می‌رسد که الگوهای تغییرات مکانی شاخص‌های کیفی آب از یک آبخوان به آبخوان دیگر و از یک متغیر به متغیر دیگر متفاوت باشد. در عین حال به نظر می‌رسد هیچ منبع منتشر شده‌ای در مورد الگوهای تغییرات مکانی فسفات وجود ندارد. بنابراین تعیین مدل الگوهای تغییرات مکانی نیترات و فسفات دشت شهرکرد سزاوار مطالعه و بررسی است. از طرف دیگر، برای پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب از روش‌های مختلف میان‌یابی استفاده می‌شود که عموماً در محیط‌های نرم‌افزاری GIS اجرا می‌شوند. اصولی‌ترین روش پهنه‌بندی، استفاده از مدل واریوگرام و معمول‌ترین روش میان‌یابی کریجینگ است (۱۰).

لاله زاری و همکاران جهت بررسی تغییرات ماهانه نیترات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد از 10 چاه مورد بهره‌برداری در هر 12 ماه سال (تیر 1386 تا خرداد 1387) به صورت ماهانه نمونه‌برداری کردند (۷). میانگین غلظت نیترات بین 21 تا 24 میلی‌گرم بر لیتر در نوسان بود. بیشترین غلظت نیترات در بخش‌هایی از جنوب دشت مشاهده شد که در دو ماه از حد استاندارد 45 میلی‌گرم در لیتر نیز بیشتر بود. این مطالعه نشان دهنده تغییرات زمانی نیترات آب زیرزمینی در طی سال بود (۷).

نقشه خطوط هم غلظت نیترات و فسفات آبخوان شهرکرد قبلاً تهیه شده است (۸). پهنه‌بندی زمین آماری نیترات و فسفات آب زیرزمینی شهرکرد هم در سال 1389 انجام شده است (۶). لیکن تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای به بررسی روند تغییرات نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد در طی یک دوره زمانی نپرداخته است. هدف از این مطالعه (۱) بررسی



شکل ۱. نقشه موقعیت دشت شهرکرد (سمت راست) و برخی نقاط مهم در دشت شهرکرد (سمت چپ)



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی دشت شهرکرد (موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده با علائم ● و ▲ نشان داده شده است)

غلظت یون نیترات و فسفات سریعاً با دستگاه اسپکتروفتومتر UV مدل DR/2010 اندازه‌گیری شد (۱۲).

۲. برآزش و انتخاب مدل واریوگرام و پهنه‌بندی

با استفاده از طول و عرض جغرافیایی محل هر نمونه (چاه) به همراه غلظت‌های اندازه‌گیری شده نیترات و یا فسفات در هر سال در محیط variovin 2.21، (۱۹)، مدل‌های گوناگون نظری واریوگرام برآزش داده شد و مدل کروی به‌عنوان بهترین مدل برای هر دو آلاینده انتخاب گردید. معادله واریوگرام کروی به شکل زیر است (۲۱).

روز انجام گرفت. موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری در همه نوبت‌های نمونه‌برداری یکسان بود. تعداد ۱۰۰ حلقه چاه کشاورزی طوری انتخاب شدند که در سطح دشت پراکنده باشند. موقعیت جغرافیایی چاه‌ها با GPS ثبت گردید. نمونه‌های آب در بطری‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری پلی‌اتیلنی که قبلاً اسیدشوئی شده و با آب مقطر شسته شده بودند، جمع‌آوری شد. برای جلوگیری از فعالیت‌های بیولوژیکی به هر بطری چند قطره تولوئن اضافه شد. بطری‌ها در زیر یخ داخل یخدان نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شدند. برای جداسازی غلظت فسفات ذره‌ای و حل شده نمونه‌ها از صافی $0.45 \mu m$ عبور داده شدند.

افزایش از جایی به جای دیگر متفاوت است. مثلاً در تحقیق ناس و برکتای (۱۸) در قونیه ترکیه، میانگین غلظت نیترات از ۲/۲ در سال ۱۹۹۸ به ۱۶/۱ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۲۰۰۱ افزایش نشان داد ولی در تحقیق فلیپو و همکاران (۱۶) بین سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۸۸ میانگین غلظت نیترات در مطالعه‌ای در آبخوان گراند مارین فرانسه فقط به اندازه ۰/۰۹ میلی‌گرم در لیتر افزایش پیدا کرده بود.

علت افزایش آلاینده‌ها در آب زیرزمینی شهرکرد را می‌توان به افزایش جمعیت شهرکرد در طی سال‌های اخیر (۴)، افزایش مصرف شوینده‌ها و افزایش تولید فاضلاب و گسترش دامداری‌های متمرکز به خصوص در بخش‌های جنوبی دشت نسبت داد. حد توصیه شده غلظت نیترات و فسفات توسط اداره حفاظت محیط زیست آمریکا به ترتیب ۴۵ و ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (۲۳). بنابراین هنوز میانگین غلظت‌های نیترات و فسفات زیر حد توصیه شده می‌باشد، اگرچه در برخی نقاط دشت (جنوب) غلظت بیشینه نیترات و فسفات از این حدود تجاوز می‌کند، به طوری که در سال ۱۳۸۹، ۳٪ نمونه‌ها و در سال ۱۳۹۰، ۶٪ نمونه‌ها غلظت نیتراتی بیش از حد ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر داشتند. این در حالی است که در سال ۱۳۸۵ غلظت نیترات هیچ‌گاه از این حد عدول نکرده بود. در ۱۳۹۰ نیز، ۴٪ نمونه‌ها غلظت فسفات بیش از ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر بود، در صورتی که در سال ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ غلظت فسفات از این حد عدول نکرده بود.

کاهش قابل مشاهده ضریب تغییرات فسفات می‌تواند نشانه‌ای از افزایش غلظت فسفات در نقاطی باشد که قبلاً کمتر به آن آلوده بوده‌اند. ضریب تغییرات غلظت نیترات از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ تقریباً ثابت مانده است. ضریب تغییرات کمتر از ۳۰٪ یکنواختی نسبی غلظت‌ها را نشان می‌دهد (۲). پس غلظت فسفات در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ نسبت به سال ۱۳۸۵ دارای یکنواختی نسبی بیشتری شده است. به عبارت دیگر تفاوت در غلظت فسفات چاه‌ها مقداری کاهش یافته است. ضریب تغییرات زیاد، معیاری از پراکندگی زیاد مشاهدات است

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

که در آن $\gamma(h)$ واریوگرام در فاصله h فاصله لگ، C_0 اثر قطعه‌ای، C_1 سقف و a دامنه تأثیر است.

سپس براساس مشخصات (سقف، دامنه تأثیر و اثر قطعه‌ای) مدل کروی منتخب نیترات و یا فسفات در هر سال و روش میان‌یابی کریجینگ، نقشه‌های پهنه‌بندی نیترات و فسفات در محیط Arc GIS 9.3 محصول (ESRI Inc, 2008) (۱۵) رسم و درصد و مساحت پهنه‌ها نیز استخراج شد.

۳. تجزیه و تحلیل آماری

خلاصه آماری و تجزیه واریانس با استفاده از STATISTICA8.0 انجام شد (۲۲).

نتایج و بحث

تمام فسفات موجود در آب زیرزمینی شهرکرد به صورت فسفات حل شده بود. به عبارت دیگر غلظت فسفات ذره‌ای در تمام نمونه‌ها صفر بود. خلاصه آماری غلظت نیترات و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد طی سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

میانگین و میانه غلظت‌های هر دو آلاینده طی دوره پنج ساله افزایش یافته است ($P < 0/05$). به طوری که میانه غلظت نیترات از ۱۷/۴ میلی‌گرم در لیتر در سال ۱۳۸۵ به ۲۹/۳ میلی‌گرم در لیتر در سال ۱۳۹۰ رسیده که حدود ۱۲ میلی‌گرم در لیتر افزایش نشان می‌دهد. میانگین و میانه غلظت فسفات در طی این دوره ۵ ساله سه برابر شده است. به طوری که میانگین فسفات در نمونه‌برداری دوم نسبت به نمونه‌برداری اول و در نمونه‌برداری سوم نسبت به نمونه‌برداری دوم افزایش یافته و به مقدار ۰/۱۵ میلی‌گرم در لیتر رسیده است.

افزایش غلظت آلاینده در آب زیرزمینی تحت تأثیر فعالیت‌های فزاینده بشری امری عادی است، ولی بزرگی

جدول ۱. خلاصه آماری غلظت نیترات در آبخوان دشت شهرکرد در سال‌های مختلف

نوبت نمونه‌برداری	میانگین	میانه	دهک اول	دهک آخر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	درصد عدول
	mg/L						%
سال ۱۳۸۵	۱۷/۹ a	۱۷/۴	۹/۶	۲۶/۳	۶/۱	۳۶	۰
سال ۱۳۸۹	۲۵/۹ b	۲۵/۵	۱۲/۳	۳۸/۷	۹/۵	۳۷	۳
سال ۱۳۹۰	۲۶/۹ b	۲۹/۳	۱۴/۵	۴۴/۵	۱۰/۹	۴۰	۶

در ستون میانگین حرف a و b نشان دهنده تفاوت معنی‌دار است ($P < 0/05$).

منظور از درصد عدول، درصد نمونه‌ها / چاه‌هایی است که غلظت نیترات آنها از ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر بیشتر است.

جدول ۲. خلاصه آماری غلظت فسفات حل شده در آبخوان دشت شهرکرد در سال‌های مختلف

نوبت نمونه‌برداری	میانگین	میانه	دهک اول	دهک آخر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	درصد عدول
	mg/L						%
سال ۱۳۸۵	۰/۰۵ a	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۲	۴۳	۰
سال ۱۳۸۹	۰/۰۹ b	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۲	۲۲	۰
سال ۱۳۹۰	۰/۱۵ c	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۰۴	۲۶	۴

در ستون میانگین حروف متفاوت (a, b, c) نشان دهنده تفاوت معنی‌دار است ($P < 0/05$).

منظور از درصد عدول، درصد نمونه‌ها / چاه‌هایی است که غلظت فسفات آنها از ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر بیشتر است.

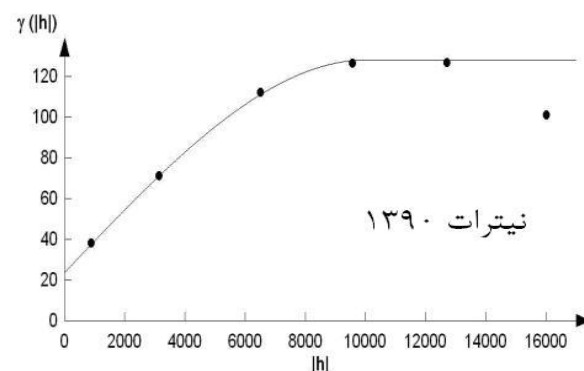
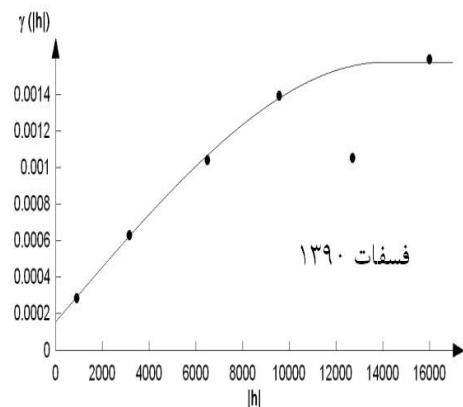
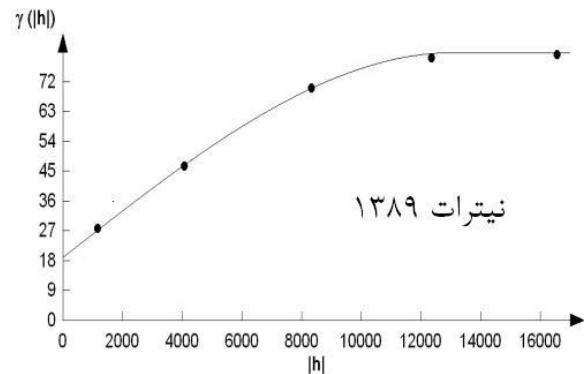
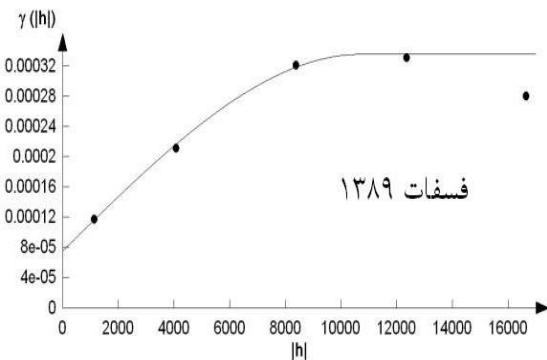
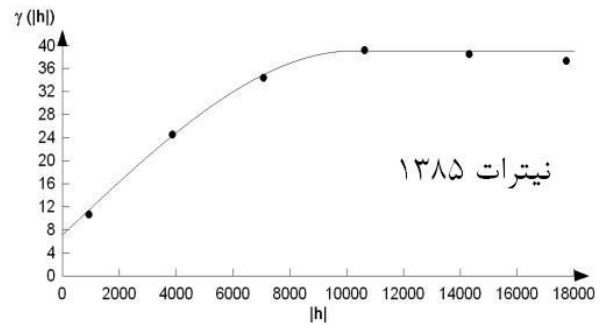
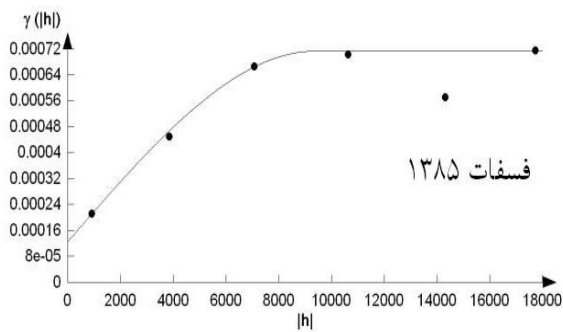
مدل واریوگرام کروی تغییرات مکانی نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد را در طی هر سال نمونه‌برداری بهتر از مدل‌های دیگر توصیف کرد و با گذشت زمان هم تغییری در الگوی کروی مشاهده نشد. در آبخوان‌های دیگر هم از مدل کروی برای توصیف تغییرات مکانی نیترات استفاده شده است (۱۰، ۱۶ و ۲۴). با این حال، به نظر می‌رسد منبع منتشر شده‌ای در مورد بررسی تغییرات مکانی فسفات در آب زیرزمینی وجود ندارد ولی در مطالعه منتشر نشده‌ای که در دشت لردگان استان چهارمحال و بختیاری صورت گرفته است، تغییرات مکانی فسفات دارای ساختار مکانی خاصی نبود و مشاهدات فسفات از مدل واریوگرام خاصی پیروی نمی‌کرد. (۱).

نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر شاخصی از قدرت ساختار مکانی متغیرهاست. چنانچه این نسبت کمتر از ۰/۲۵ شود نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی خواهد بود (۱۳). در آبخوان

که می‌تواند ناشی از کاربری اراضی و عوامل بیرونی اثرگذار بر وضعیت هیدرولوژی باشد (۳). این بدان مفهوم است که تفاوت غلظت نیترات در چاه‌های مختلف بیشتر از تفاوت غلظت در فسفات آنها است.

۱. تغییرات در الگوهای توزیع مکانی نیترات و فسفات آب زیرزمینی شهرکرد

خلاصه آماری یک متغیر کیفی اطلاعات کافی و صریحی در مورد توزیع و تغییرات مکانی آن متغیر نمی‌دهد. از این روی توسل به زمین آمار می‌تواند کمبود اطلاعات در این زمینه را جبران کند. پس از اطمینان از همسانگردی واریوگرام سطحی، سه واریوگرام‌های تجربی نیترات و فسفات و مدل کروی برازش شده به آنها ترسیم و در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات مدل‌های واریوگرام برازش شده در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.



شکل ۳. واریوگرام‌های تجربی و مدل کروی برازش شده به نیترات و فسفات در آبخوان دشت شهرکرد طی ۳ سال (محور افقی فاصله (h) جفت نقاط و محور عمودی، واریانس (مربع تفاضل داده اندازه‌گیری شده و مقدار برآورد شده))

حداکثر مقدار می‌رسد. بایستی توجه داشت که اکثر فعالیت‌های انسانی و دامداری‌های فشرده در بخش جنوبی و جنوب شرقی واقع است. وجود تصفیه‌خانه شهرکرد نیز به آلودگی در این بخش دامن می‌زند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت آلودگی دو آلاینده از سال ۱۳۸۵ به ۱۳۹۰ افزایش یافته و مساحت پهنه‌های آلوده‌تر به نیترات و فسفات (غلظت بیشتر) زیاد شده است. با توجه به جهت گرادیان هیدرولیکی آب زیرزمینی، که از شمال دشت به

شهرکرد، متوسط نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر (C_0/C_0+C_1) برای فسفات و نیترات کمتر از ۰/۲۵ است که نشان دهنده وابستگی قوی مکانی در محدوده دامنه تأثیر است. وابستگی مکانی نیترات و فسفات با گذشت زمان قوی باقی مانده است (جداول ۳ و ۴).

شکل ۴ نشان‌دهنده تشابه در روند آلودگی نیتراتی و فسفاتی آب زیرزمینی شهرکرد است. آلودگی نیتراتی و فسفاتی در شمال آبخوان دارای کمترین میزان و در بخش جنوبی به

جدول ۳. مشخصات مدل وارویگرام توصیف‌کننده تغییرات مکانی نترات در آب زیرزمینی شهرکرد طی سال‌های مختلف

نوبت نمونه‌برداری	مدل	دامنه تأثیر (متر)	آستانه تأثیر (C ₀ +C)	اثر قطعه‌ای (C ₀)	C ₀ /(C ₀ +C)	کلاس وابستگی مکانی
سال ۱۳۸۵	کروی	۱۰۲۶۰	۳۹/۲	۷/۲	۰/۱۸	قوی
سال ۱۳۸۹	کروی	۱۳۰۹۰	۸۱	۱۹/۱۱	۰/۲۳	قوی
سال ۱۳۹۰	کروی	۱۰۰۳۰	۱۲۸	۲۴	۰/۱۸	قوی

جدول ۴. مشخصات مدل وارویگرام توصیف‌کننده تغییرات مکانی فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد طی سال‌های مختلف

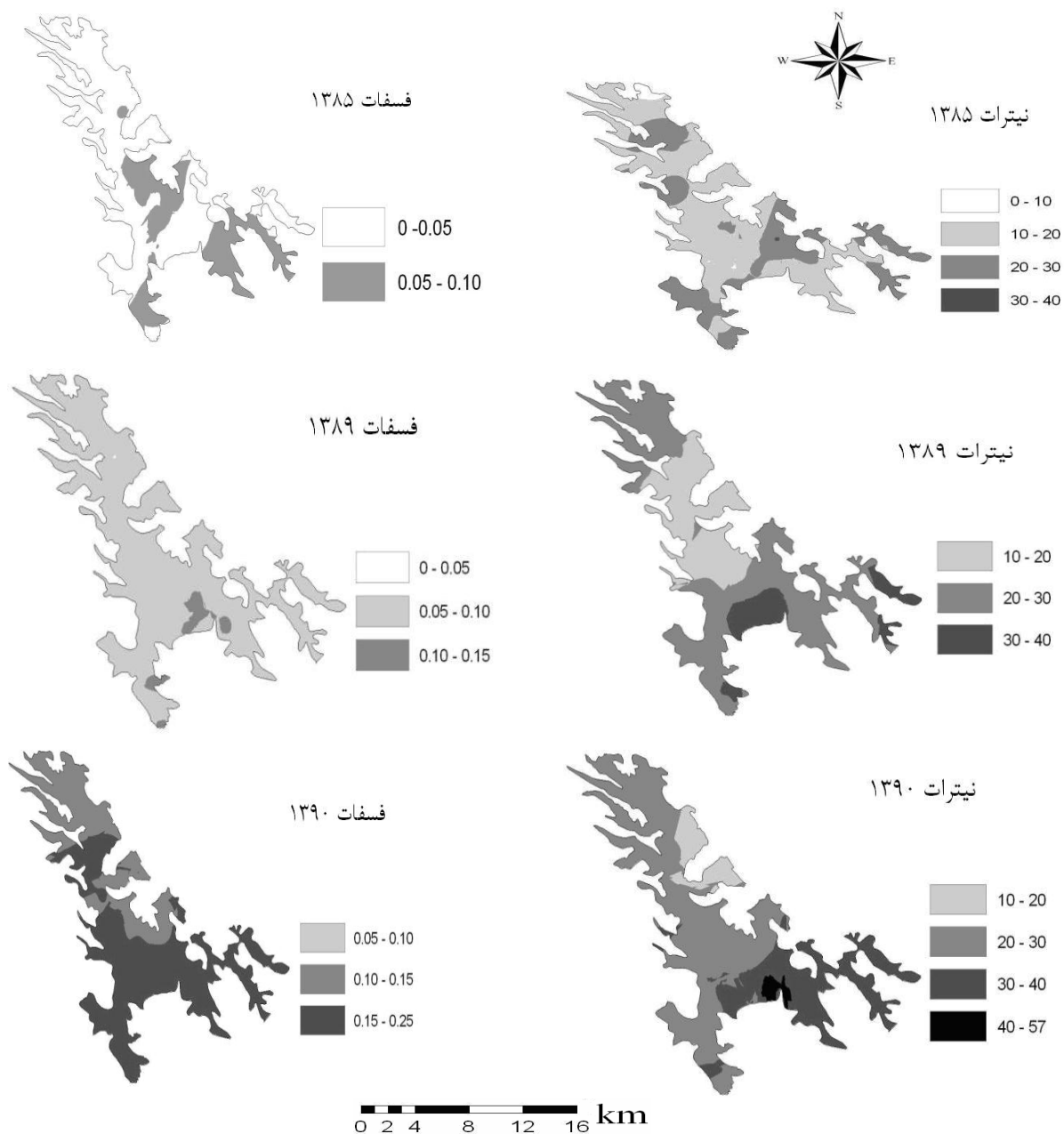
نوبت نمونه‌برداری	مدل	دامنه تأثیر (متر)	آستانه تأثیر (C ₀ +C)	اثر قطعه‌ای (C ₀)	C ₀ /(C ₀ +C)	کلاس وابستگی مکانی
سال ۱۳۸۵	کروی	۱۲۴۱۰	۰/۰۰۰۷۰	۰/۰۰۰۱۲۶	۰/۱۷	قوی
سال ۱۳۸۹	کروی	۱۰۷۰۹	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۲۳	قوی
سال ۱۳۹۰	کروی	۱۴۱۱۰	۰/۰۰۱۵۸	۰/۰۰۰۱۶۰	۰/۱۰	قوی

از قسمت‌های دیگر دشت است. علت اصلی آلودگی این بخش از دشت را می‌توان به شدت بیشتر فعالیت‌های کشاورزی، ورود پساب‌ها به آب‌های زیرزمینی به علت وجود تصفیه‌خانه در این بخش، وجود دام بیشتر و کم عمق بودن سطح ایستابی نسبت داد. با توجه به این‌که جهت گرادیان هیدرولیکی از شمال دشت به قسمت‌های جنوبی است (۸)، انتقال نترات از نواحی دیگر (شمالی) به این بخش از آبخوان را نیز می‌توان محتمل دانست. در قسمت جنوب غربی دشت که شامل نواحی طاقانک، هفشجان و شمس‌آباد است (شکل ۱)، نیز غلظت نترات نسبتاً بالا است به طوری که غلظت‌ها در این قسمت نسبت به سال ۱۳۸۵ زیادتر شده است. در این نواحی فعالیت‌های دامداری و نسبتاً کشاورزی شدت دارد. ولی در نواحی شمالی و میانه دشت که شامل شهرکرد، چالستر، روستاهای کاکلک، پیربلوط و هرچگان است چاه‌ها از تراکم کمتری نسبت به جنوب دشت برخوردار هستند و اگر چه غلظت‌ها در این قسمت نسبت به سال ۱۳۸۵ بیشتر شده بود ولی نسبت به جنوب دشت، چاه‌ها از غلظت نترات نسبتاً کمتری برخوردار بودند.

بررسی غلظت فسفات در سال ۱۳۹۰ نسبت به سال ۱۳۸۵ نشان داد که غلظت فسفات در طی این دوره روندی رو به

سمت جنوب است آلودگی نترات و فسفات از شمال به طرف جنوب منتشر شده و در قسمت جنوبی دشت تجمع یافته است. همچنین، در بخش جنوبی دشت سطح ایستابی حداقل فاصله را با سطح زمین دارد که با توجه به وجود منابع آلاینده در این بخش از قبیل مراکز صنعتی، دامداری فشرده و تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد احتمال آلودگی آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. این عوامل به‌ویژه جهت جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب منجر به افزایش آلودگی‌ها در این قسمت شده است. (۸).

با توجه به (شکل ۴)، غلظت نترات با گذشت زمان از سال ۱۳۸۵ به سال ۱۳۹۰ افزایش یافته است به طوری که در سال ۱۳۸۵ بیشتر سطح دشت دارای غلظت نترات بین ۲۰-۱۰ میلی‌گرم در لیتر بوده، در صورتی که در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ غلظت نترات پهنه دشت شهرکرد زیاد شده است به خصوص قسمت‌های جنوبی که شامل فرخشهر، شهر کیان، و روستای بهرام‌آباد است. در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ غلظت نترات برخی از چاه‌های بخش جنوبی بیشتر از حد استاندارد ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر شد. محققان دیگر (۷ و ۸) نیز به این نتیجه رسیدند که در قسمت جنوبی دشت مقدار آلودگی نتراتی بیشتر



شکل ۴. نقشه‌های پهنه‌بندی نیترات (سمت راست) و فسفات حل شده (سمت چپ) در طی ۳ سال نمونه‌برداری

بخش‌های دشت افزایش یافته است (۸). این بخش‌ها شامل فرخ‌شهر، هفشجان و طاقانک است. دلیل افزایش غلظت فسفات را در این نواحی احتمالاً می‌توان به تراکم دامداری‌ها و نشت فسفات محلول از فضولات دامی در این ناحیه خصوصاً در اطراف شهر هفشجان نسبت داد. احتمالاً کم عمق بودن سطح ایستابی و جهت گرا دیان هیدرولیکی در دشت نیز به آلودگی

افزایش داشته است، به طوری که در سال ۱۳۹۰ غلظت فسفات برخی از چاه‌های جنوبی بیش از حد مجاز $0/2$ میلی‌گرم بر لیتر شد. به خصوص با افزایش فعالیت دامداری‌ها و فضولات دامی در قسمت جنوب غربی، این نسبت بیشتر شده است. در مطالعه‌ای نیز در دشت شهرکرد مشخص شد که در بخش‌هایی از جنوب شرقی و جنوب غربی غلظت فسفات نسبت به سایر

جدول ۵. درصد* و مساحت پهنه‌های آلوده به نیترات طی سال‌های مختلف نمونه‌برداری در آب زیرزمینی دشت شهرکرد

سال ۱۳۹۰		سال ۱۳۸۹		سال ۱۳۸۵		بازه پهنه
درصد	ha	درصد	ha	درصد	ha	mg/L
				۱/۳	۷۴۰	۰-۱۰
۸/۰	۴۴۰۷	۲۹/۴	۱۶۱۹۸	۶۳/۷	۳۵۰۷۲	۱۰-۲۰
۶۲/۴	۳۴۳۸۶	۵۹/۰	۳۲۵۱۶	۳۴/۹	۱۹۲۴۴	۲۰-۳۰
۲۷/۷	۱۵۲۵۱	۱۱/۹	۶۳۸۵	کمتر از ۰/۱	۴۰	۳۰-۴۰
۱/۹	۱۰۵۴					>۴۰

*: درصدها به یک رقم اعشار گرد شده‌اند.

جدول ۶. درصد* و مساحت پهنه‌های آلوده به فسفات طی سال‌های مختلف نمونه‌برداری در آب زیرزمینی دشت شهرکرد

سال ۱۳۹۰		سال ۱۳۸۹		سال ۱۳۸۵		بازه پهنه
درصد	ha	درصد	ha	درصد	ha	mg/L
		کمتر از ۰/۱	۱۳	۷۰/۵	۳۸۸۵۵	۰-۰/۰۵
۳۴/۷	۱۹۱۴۷	۹۵/۹	۵۲۸۶۵	۲۹/۵	۱۶۲۴۴	۰/۰۵-۰/۱۰
۳۳/۳	۱۸۳۷۳	۴/۰	۲۲۲۰			۰/۱۰-۰/۱۵
۳۱/۹	۱۷۵۷۸					۰/۱۵-۰/۲۵

*: درصدها به یک رقم اعشار گرد شده‌اند.

فسفاتی این بخش از دشت دامن زده است.

۲. تغییرات در درصد و مساحت پهنه‌های آلوده به نیترات و فسفات

تغییرات مساحت کلاس‌های آلودگی می‌تواند نتیجه اعمال مدیریت در طی یک دوره و یا عکس‌العمل سفره در مقابل فعالیت‌های فصلی در سطح حوضه آبخوان را منعکس سازد. مدیریت فعلی و یا فعالیت‌های جاری می‌تواند به کاهش یا افزایش مساحت یک کلاس آلودگی جدید منجر شود. جدول‌های ۵ و ۶، درصد و مساحت پهنه‌های آلوده به نیترات و فسفات را در طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، در سال ۱۳۸۵ حدود ۱/۳ درصد آبخوان دارای غلظت نیتراتی حدود ۱۰-۰ میلی‌گرم در لیتر بود و بیشترین مساحت یعنی حدود ۶۴ درصد

سطح آبخوان به کلاس ۲۰-۱۰ میلی‌گرم در لیتر اختصاص داشت. در صورتی که در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ حداقل غلظت نیترات آبخوان حدود ۱۰ میلی‌گرم در لیتر است. یعنی حداقل نیترات از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ افزایش یافته است و از درصد و مساحت کلاس ۲۰-۱۰ کاسته شده و به مساحت کلاس‌های ۳۰-۲۰ و ۴۰-۳۰ میلی‌گرم در لیتر افزوده شده است. به بیشترین غلظت نیترات نیز از سال ۱۳۸۵ تا سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ افزوده شده است، به طوری که در سال ۱۳۹۰ کلاس بزرگ‌تر از ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر نیز ظاهر شده است.

غلظت فسفات در سال ۱۳۸۵ دارای بیشترین مساحت در کلاس ۰/۰۵-۰ میلی‌گرم در لیتر است (جدول ۶). در صورتی که در سال ۱۳۸۹ از مساحت این کلاس کاسته شده و به مساحت کلاس‌های ۰/۱۰-۰/۰۵ و ۰/۱۵-۰/۱۰ میلی‌گرم در لیتر افزوده شده است. در سال ۱۳۹۰ حداکثر غلظت فسفات

فسفات نشان داد که هر دو آلاینده دارای ساختار مکانی قوی در دامنه تأثیرشان هستند و این ساختار مکانی با گذشت زمان همچنان قوی مانده است.

- نتایج پهنه‌بندی نیز نشان داد که آلودگی نیتراتی و فسفاتی در سال ۱۳۹۰ نسبت به سال ۱۳۸۵ بیشتر شده است.
- در قسمت‌های جنوبی آبخوان آلودگی نیتراتی و فسفاتی شدیدتر است.
- غلظت نیترات و فسفات در بعضی از قسمت‌های جنوبی آبخوان از حد استاندارد جهانی (به ترتیب ۴۵ و ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر) فراتر می‌رود.
- در طی دوره مورد مطالعه از درصد و مساحت کلاس‌های با آلودگی کمتر کاسته شده و به درصد و مساحت کلاس‌ها با آلودگی بیشتر افزوده شده است.
- نقاط آلوده‌تر در معرض آلودگی بیشتری قرار دارند. با روند فعلی نقاط آلوده‌تر در معرض آلودگی بیشتر به نیترات و فسفات قرار دارند.

۰/۲۵ میلی‌گرم در لیتر شده است که از استاندارد اداره حفاظت محیط زیست آمریکا (۰/۲ میلی‌گرم در لیتر) بیشتر است. در سال ۱۳۹۰ کلاس ۰-۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر حذف شده است و حدود ۳۰ درصد سطح آبخوان به هر یک از کلاس‌های آلوده‌تر اختصاص یافته است (جدول ۶).

نتیجه‌گیری

- بررسی تغییرات غلظت نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد در دوره پنج ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰) نشان داد که میانگین غلظت نیترات آبخوان از ۱۸ به ۲۷ میلی‌گرم در لیتر و غلظت فسفات از ۰/۰۵ به ۰/۱۵ میلی‌گرم در لیتر افزایش پیدا کرده است.
- الگوی تغییرات مکانی نیترات و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد با یک مدل واریوگرام کروی به خوبی قابل بیان است. این الگو با گذشت زمان تغییر نکرده است.
- نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر (C_0/C_0+C) در نیترات و

منابع مورد استفاده

۱. استواری، ی. ۱۳۹۰. ارزیابی کیفیت آب آبخوان‌های منطقه لردگان و تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت این آبخوان‌ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
۲. رضائی، ع. و ع. ل. میرمحمد میبدی. ۱۳۸۴. آمار و احتمالات (کاربرد در کشاورزی). چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.
۳. رضایی، م. ن. دواتگر، خ. تاجداری و ب. ابولپور. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استان گیلان با استفاده از زمین‌آمار. آب و خاک ۲۴(۵): ۹۳۲-۹۴۱.
۴. زارع شاه آبادی، ع. و ع. عسگری سوادجانی. ۱۳۸۸. تحولات جمعیتی استان چهارمحال و بختیاری طی سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۴۵. هشتمین همایش از سلسله همایش‌های منطقه‌ای چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، فروردین ۱۳۸۸، ۲۱ ص.
۵. شعبانی، م. ۱۳۸۷. تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی در دشت ارسنجان. مجله مهندسی آب ۱: ۴۷-۵۷.
۶. فتحی، ا. و خ. بیگی هرچگانی. ۱۳۹۲. الگوهای تغییرات مکانی و پهنه‌بندی زمین‌آمار نیترات و فسفات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد. مجله علوم و مهندسی آبیاری ۳۶(۱): ۱۰۳-۱۱۲.
۷. لاله‌زاری، ر. س. ح. طباطبایی و ن. یارعلی. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات ماهانه نیترات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد و پهنه‌بندی با

- استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله پژوهش آب ایران ۳(۴): ۹-۱۷.
۸. میرزایی، س. ۱۳۸۸. ارزیابی آسیب‌پذیری و تهیه نقشه‌های خطر آلودگی آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از GIS و مدل‌های DRASTIC و SINTACS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ۱۷۰ ص.
۹. ناصری، م.، م. رقیمی، م. ا. یخکشی، م. شاه‌پسندزاده و ح. دهقان. ۱۳۸۵. بررسی عوامل مؤثر در تغییرات مکانی غلظت نترات آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز قره سو، استان گلستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۳(۱): ۱۰۸-۱۱۵.
۱۰. نجاتی‌جهرمی، ز.، م. چیت‌سازان و ی. میرزایی. ۱۳۸۸. بررسی زمین آماری توزیع نترات در آبخوان آبرفتی دشت عقیلی (شمال شهرستان شوشتر در استان خوزستان) در محیط GIS. مجموعه مقالات شانزدهمین همایش ژئوماتیک تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور. ۲۳ - ۲۰ اردیبهشت. ۹ ص.
۱۱. نظری‌زاده، ف.، ب. ارشادیان و ک. زند و کیلی. ۱۳۸۵. بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بالارود در استان خوزستان. مجموعه مقالات اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود (فرصت‌ها و چالش‌ها). دانشگاه شهرکرد، صفحات ۱۲۳۶-۱۲۴۰. ۱۴ و ۱۵ شهریور.
12. APHA. 1998. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th ed., American Pub. Health Association, Washington, DC.
13. Cambardella, C.A., T.B. Moorman., J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco and A. E. Koropaka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1501-1511.
14. Chen, S., W. Wu , K. Hu and W. Li. 2010. The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale. Ecol. Complex. 7: 131-138.
15. ESRI Inc. 2008. ArcGISTM. Version 9.3. www.esri.com.
16. Flipo, N., N. Jeanneeb, M. Poulin, S. Evena and E. Ledoux. 2007. Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France), combined use of geostatistics and physically based modeling. Environ. Pollut. 146: 241-256.
17. Handa, B.K. 1990. Contamination of groundwater by phosphates. Bhujal News 5: 24-36.
18. Nas, B. and A. Berkta. 2006. Groundwater contamination by nitrates in the city of Konya, (Turkey): A GIS perspective. J. Environ. Manage. 79: 30-37.
19. Pannatier, Y. 1998. Variowin: Software for Data Analysis in 2D. Version 2.21. Springer Verlag Pub., USA.
20. Smith, P.C and G. Schrale. 1982. Proposed rehabilitation of an aquifer contaminated with cheese factory wastes. AWAA Water 9(1):21-24.
21. Scott, D.H. 2000. Soil physics, Agricultural and environmental applications. Iowa State University Press. Iowa. 410 pages.
22. StatSoft Inc. 2008. STATISTICA (data analysis software system). Version 8. www.statsoft.com
23. U.S. EPA. 1995. Quality criteria for water. EPA 440/5-86-001. USEPA, Washington.
24. Uyan, M and T. Cay. 2010. Geostatistical methods for mapping groundwater nitrate concentrations. 3rd Intl. Conf. on cartography and GIS, 12-20 June, 2010, Nessebar, Bulgaria.

Spatial Variability and Mapping of Nitrate and Phosphate in Shahrekord Groundwater Over a Period of Five Years

E. Fathi Hafshejani and H. Beigi Harchegani^{1*}

(Received: Nov. 06-2011 ; Accepted : June 13 -2012)

Abstract

Trends in groundwater pollution with nitrate and phosphate may be an indication of water resources management. The aims of this research were to determine changes in nitrate and phosphate concentration and changes in spatial variability patterns of nitrate and phosphate and distribution over a 5-year period. To do this, 100 agricultural wells were sampled in the years 2006, 2010 and 2011, and analyzed for nitrate and phosphate concentrations. From 2006 to 2011, the mean nitrate concentration increased from 18 to 27 mg/L and the mean phosphate concentration from 0.05 to 0.15 mg/L. Spatial patterns did not change, and spherical model described the patterns throughout this period. Maps showed that the nitrate and phosphate concentrations are higher in the south, and lower in the north of the aquifer. It seems that the presence of the municipality treatment plant, intensive cattle farming, shallower water-table and inward flow gradient may be the reasons for the higher concentration in the southern part of the aquifer. From the comparison of the maps, it was clear that the areas of less polluted classes had shrunk while the areas of more polluted classes had grown from 2006 to 2011.

Keywords: Aquifer, Kriging, Mapping, Variogram.

1. Dept. of Soi. Sci., Univ. of Shahrekord, Shahrekord, Iran.

*: Corresponding Author, Email: beigi.habib@gmail.com