

ترسیم نقشه‌ی تلفیقی آلودگی به نیترات و فسفر در آب زیرزمینی دشت شهرکرد و بررسی تغییرات آن طی یک دوره چهار ساله

حبیب بیگی هرچگانی^{۱*} و الهام فتحی هفشجانی^۲

^{۱*} - استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

^۲ - دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۲۴

چکیده

تشدید آلودگی آبخوان شهرکرد از مقایسه‌ی شاخص‌های ساده‌ی آماری حاصل از نتایج نمونه‌برداری دوره‌ای و روش‌های جاافتاده قابل درک و محرز است اما مدیریت تلفیقی آبخوان نیازمند روش‌های نوین‌تری است. هدف اصلی این پژوهش بررسی تغییرات توأم آلودگی آب زیرزمینی دشت شهرکرد به نیترات و فسفر طی یک دوره چهارساله به روشی نوین بود. برای این منظور، نقشه‌های نیترات و فسفر بر اساس حدود مجاز سازمان بهداشت جهانی نرمال شده و سپس به نقشه‌های رتبه تبدیل شدند. با استخراج وزن هر مولفه از نقشه رتبه‌ی آن نقشه‌ی شاخص تلفیقی نیترات و فسفر برای سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ تهیه شد. نقشه‌ی تغییرات شاخص تلفیقی برای دوره‌ی چهار ساله از تفاضل دو نقشه به دست آمد. هم‌بستگی قوی نقشه‌ی تلفیقی با نقشه‌های نیترات ($r=+0.94$) و فسفر ($r=+0.87$) حاکی از انعکاس درست توزیع نیترات و فسفر در آن بود. نقشه‌ی تفاضل شاخص تلفیقی افزایش آلودگی آب را حداقل ۲ درصد، حداکثر ۴ درصد و به طور میانگین ۲/۸ درصد برآورد کرد. در طی این دوره، حدوداً ۵/۳ درصد سطح آبخوان کیفیت آب نسبتاً خوب‌تر به کیفیت نسبتاً پائین‌تر افت کرده است. نیترات در مقایسه با فسفر سهم بیشتری در آلودگی آبخوان شهرکرد دارد اما در طی این دوره سهم فسفر افزایش یافته است. به‌کارگیری روش به کار رفته در پژوهش حاضر، یعنی محاسبه‌ی شاخص تلفیقی در محیط جی‌آی‌اس، و به دنبال آن تفاضل نقشه‌ها قادر است تغییرات آلودگی آبخوان را به صورت کمی‌تر و احتمالاً واقعی‌تر آشکار سازد. با این روش سهم نسبی و روند تغییرات سهم هر آلاینده نیز قابل برآورد است. تهیه نقشه‌ی تلفیقی و محاسبه‌ی شاخص آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات و فسفر برای ارزیابی احتمال رشد جلبکی و پیامدهای آن (گرفتگی لوله‌های آب کم‌فشار، تغییر بو و طعم آب و هزینه‌های تصفیه) مفید به نظر می‌رسد.

کلید واژه‌ها: آلودگی، آب شرب، سهم آلاینده، شاخص تلفیقی، حدود مجاز سازمان بهداشت جهانی، جی‌آی‌اس.

Mapping of Shahrekord Groundwater Nitrates and Phosphorous Based on an Integrated Index and its Usage for Assessing Contamination over a Time Interval

H. Beigi Harchegani^{1*} and E. Fathi Hafshejani²

1* - assistant professor, Soil Science Group, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord.

2- former graduate student, Soil Science Group, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord

Received: 13 January 2013

Accepted: 4 February 2014

Abstract

Intensifying contamination of Shahrekord aquifer has been already understood and documented by periodic sampling, use of simple statistical indicators and established procedures. However, integrated management of aquifers requires improved methods. The main purpose of this study was to detect changes in both nitrate and phosphorus pollution of Shahrekord groundwater over a period of four years (2006-2010) by an integrated index. For this purpose, nitrate and phosphorus maps were normalized by WHO standards, converted to rank maps and then, integrated maps of nitrate and phosphorus were produced for both years of 2006 and 2010. Changes of integrated index over this 4-year period were obtained by differencing the two maps. Integrated map was strongly correlated with nitrate map ($r=0.94$) and with phosphorus map

($r=0.87$) indicating it properly reflected the distribution of both contaminants. Difference map showed a minimum of 2%, a maximum of 4% and on average 2.8% of increase in contamination. During this period, in approximately 5.3% of the aquifer, water quality deteriorated. Compared with phosphorus, nitrate has a greater share in Shahrekord aquifer contamination but over this period the phosphorus's share has increased. Applying the procedure used in the present study, enables the managers and planners to quantify trends in aquifer contamination more accurately. Also, with this method, the relative involvement of each contaminant in pollution, at the beginning and end of a time interval, can be estimated. An integrated map and its affiliated integrated index of nitrate and phosphate in groundwater appears to be useful for the assessment of algal growth and its consequences such as clogging of low-pressure irrigation pipes, water smell and taste deterioration and increased cost of treatment.

Keywords: Contaminant share; Drinking water; GIS, pollution; WHO standards.

مقدمه

آبشویی نیترات از زمین‌های زراعی به آب زیرزمینی و خطرات بهداشتی نیترات در آب آشامیدنی کاملاً مستند شده است (مرینگتن^۱، ۲۰۰۲). در مناطقی که بهره‌برداری از زمین شدید است، به دلیل استفاده از کودهای دامی و فاضلاب‌های شهری که حاوی فسفر محلول هستند، احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی به فسفر نیز وجود دارد (همیلتون و هلسل^۲، ۱۹۹۵). اضافه شدن فسفر به آب حتی در مقادیر کم همراه با نیتروژن می‌تواند رشد سریع جلبک‌ها و گیاهان آبی را باعث و به پدیده یوتروفیک شدن آب‌ها بینجامد که مشکلاتی را در ظاهر، بو و مزه‌ی آب پدید می‌آورد (مرینگتن، ۲۰۰۲). سازمان بهداشت جهانی حد مجاز شرب نیترات و فسفر در آب را به ترتیب ۴۵ و ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر و موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران حد مجاز نیترات و فسفر را به ترتیب ۵۰ و ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر تعیین کرده‌اند (بی نام، ۲۰۱۱؛ بی نام، ۱۳۸۸).

پژوهش در مورد ارزیابی غلظت فسفر و به ویژه نیترات آب‌های زیرزمینی و تهیه نقشه‌های آلودگی آن کم نبوده است، مثلاً راتو و پراساد^۳، (۱۹۹۷) با بررسی نمونه‌های آب از ۱۱۳ حلقه چاه، آلودگی فسفر در آب‌های زیرزمینی حوزه‌ی آبخیز وامسادهارا در هند دریافتند که غلظت فسفات از ۰/۷ تا ۷/۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بود که البته این مقادیر بسیار زیاد بوده و حاکی از آلودگی شدید است. ژنگ و همکاران^۴، (۱۹۹۶) آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی شمال چین را بررسی و متوجه شدند که در نیمی از ۶۹ چاه مورد مطالعه غلظت نیترات متجاوز از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر (بیشتر از حد مجاز ۴۵ میلی‌گرم در لیتر) بود، که برای نوشیدن محدودیت ایجاد می‌کرد. استواری و همکاران (۱۳۹۱) غلظت نیترات و فسفر در آبخوان لردگان در استان چهارمحال و بختیاری را بررسی و پهنه‌بندی نمودند. در سال‌های اخیر، سه پژوهش به بررسی نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهر کرد، از آبخوان‌های مهم

استان چهارمحال و بختیاری، پرداخته‌اند. در پژوهش اول، میرزایی (۱۳۸۸) نقشه‌های آلودگی نیترات و فسفر را با استفاده از داده‌های میانگین غلظت نیترات به روش کریجینگ تولید کرد. میانگین غلظت نیترات ۱۸ حدود میلی‌گرم در لیتر و میانگین غلظت فسفر ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. غلظت نیترات و فسفر در تمام چاه‌ها از حد مجاز پایین‌تر بود. در پژوهش دوم، لاله‌زاری و همکاران (۱۳۸۸) با برداشت ۱۰ نمونه در هر ماه سال، تغییرات ماهانه نیترات در آب زیرزمینی دشت را بین ۲۱ تا ۲۴ میلی‌گرم بر لیتر برآورد و نقشه‌های هم‌غلظت نیترات را برای هر ماه را ترسیم کردند. در پژوهش دیگر، فتحی (۱۳۹۰)، با نمونه‌برداری از ۹۷ حلقه چاه در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ به بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهر کرد پرداخت و نقشه‌های مجزای آلودگی به نیترات و فسفر را تهیه کرد. مشخص شده است طی یک دوره پنج ساله میانگین غلظت‌های نیترات و فسفر، به طور معنی‌داری، به ترتیب از ۱۸ به ۲۷ و از ۰/۰۵ به ۰/۱۵ میلی‌گرم بر لیتر افزایش پیدا کرده است و علاوه بر این به مساحت پهنه‌های آلوده‌تر افزوده شده است (فتحی و بیگی هرچگانی، ۱۳۹۱).

در تمام مطالعات انجام گرفته، از نقشه‌های مجزایی برای نشان دادن میزان آلودگی نیتراتی یا فسفوری آبخوان‌ها استفاده شده است ولی نقشه‌های منفرد نیترات و فسفر فقط برای مدیریت منفرد هر آلاینده مفید است. در مدیریت جامع‌نگر وجود ابزار مدیریت تلفیقی مفید خواهد بود. از این رو، به نظر میرسد برای ارزیابی میزان آلودگی توأم آب به نیترات و فسفر تهیه‌ی نقشه‌ی تلفیقی نیز مفید باشد. نقشه‌ی تلفیقی نیترات و فسفر می‌تواند علاوه بر ارزیابی بهداشتی آب در ارزیابی خطر رشد جلبکی در آب نیز به کار رود. رشد جلبکی هزینه‌های تصفیه‌ی آب شرب را بالا می‌برد (مرینگتن، ۲۰۰۲) و ممکن است در گرفتگی فیزیکی سامانه‌های آبیاری کم‌فشار گلخانه‌ای و قطره‌ای نقش داشته باشد (کامبراتو و لویز^۵، ۲۰۱۲).

- 1- Merrington
- 2- Hemilton and Helsel
- 3- Rao and Prasad
- 4- Zhang *et al.*

جغرافیایی چاه‌ها با جی پی اس ثبت گردید. نمونه‌های آب در بطری‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری پلی‌اتیلنی که قبلاً اسیدشوئی 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 فسفر ذره‌ای و محلول، نمونه‌ها از صافی ۰/۴۵ میکرومتر عبور داده شدند. سپس غلظت یون نیترات و فسفر (ذره‌ای و محلول) سریعاً با دستگاه اسپکتروفتومتر UV مدل DR/2010 اندازه‌گیری شد (بی نام، ۱۹۹۸).

تهیه‌ی نقشه‌ی تلفیقی آلودگی به نیترات و فسفر

الگوهای تغییرات مکانی نیترات و فسفر (یعنی مدل واریوگرام و مشخصات آن: دامنه‌ی تأثیر، آستانه‌ی تأثیر و اثر قطعه‌ای) با ترسیم واریوگرام تجربی و برازش بهترین مدل نظری به آن تعیین شد. (جزئیات آن در فتحی (۱۳۹۰) آمده است). نقشه‌های هر یک از مؤلفه‌ها بر اساس واریوگرام منتخب و با استفاده از روش کریجینگ معمولی تهیه شد. روش کریجینگ معمولی مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی نیترات و فسفر در سرفه شهرکرد است که جزئیات آن در فتحی (۱۳۹۰) آمده است. نقشه‌های نرمال‌شده‌ی هر مؤلفه (C_N) با استفاده از رابطه‌ی زیر تهیه شد:

$$C_N = (C - C_{WHO}) / (C + C_{WHO}) \quad (1)$$

که در آن C مقدار هر پیکسل در نقشه‌ی اولیه هر مؤلفه و C_{WHO} بیشترین حد مجاز هر مؤلفه بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی است (ماچیوال و همکاران، ۲۰۱۱). مقدار C (سازمان بهداشت جهانی) برای نیترات ۴۵ و برای فسفر ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر است (بی نام، ۲۰۱۱). در نقشه‌های حاصل، مقدار هر پیکسل بین -۱ تا +۱ قرار می‌گیرد. سپس هر نقشه‌ی C_N با استفاده از معادله‌ی چند جمله‌ای زیر به یک نقشه‌ی رتبه (R) تبدیل شد (بابیکر و همکاران ۲۰۰۷):

$$R = 0.5 * (C_N)^2 + 4.5 (C_N) + 5 \quad (2)$$

که در آن هر پیکسل مقداری بین ۱ و ۱۰ دارد. رتبه‌ی ۱ نشان دهنده‌ی کمترین میزان تأثیر بر آلودگی آب و رتبه‌ی ۱۰ نشان دهنده‌ی بیشترین میزان تأثیر بر آلودگی آب است. کمترین مقدار هر پیکسل در نقشه‌ی C_N که -۱ است معادل ۱ در نقشه‌ی رتبه و بیشترین مقدار هر پیکسل در نقشه‌ی C_N که +۱ است معادل ۱۰ در نقشه‌ی رتبه است. میانگین مقدار پیکسل‌های مربوط به هر مؤلفه از نقشه‌ی رتبه‌ی آن استخراج شد و به عنوان وزن آن مؤلفه در گام بعدی مورد استفاده قرار گرفت. نقشه‌ی شاخص تلفیقی آلودگی نیتراتی و فسفاتی ($PI_{N\&P}$) از معادله‌ی زیر به دست آمد:

اگر چه تاکنون نقشه‌ی تلفیقی مختص نیترات و فسفر برای هیچ سفره‌ی آب زیرزمینی تهیه نشده است ولی در زمینه‌ی تلفیق یون نیترات با مؤلفه‌های مختلف دیگر آب‌های زیرزمینی (غیر از فسفر) بر پایه جی‌آی‌اس^۱ برای تهیه نقشه‌ی کیفی آبخوان‌ها مطالعاتی صورت گرفته است. از جمله: بابیکر و همکاران^۲ (۲۰۰۷) کیفیت آب زیرزمینی حوزه ناسونو (ژاپن) و ماچیوال و همکاران^۳ (۲۰۱۰) کیفیت آب زیرزمینی راجستان واقع در غرب هند را بر پایه جی‌آی‌اس با استفاده از چندین مؤلفه‌ی کیفی از جمله نیترات بررسی کردند. در این دو پژوهش، نقشه‌های این مؤلفه‌ها پس از ترسیم به روش کریجینگ به نقشه‌های نرمال و سپس به نقشه‌های رتبه تبدیل شد. از میانگین رتبه‌ی هر نقشه به عنوان وزن هر مؤلفه در تهیه‌ی نقشه‌ی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شد. مقایسه‌ی نقشه‌های منفرد نیترات یا فسفر در سال‌های اخیر نشان داد شدت آلودگی پهنه‌ها به نیترات و فسفر در آبخوان شهرکرد رو به افزایش بوده است (فتحی و بیگی هرچگانی، ۱۳۹۱). از طرف دیگر، تاکنون سهم نیترات یا فسفر در آلودگی آب، حداقل به طور صریح و کمی، و نیز تغییرات این سهم در طول یک دوره‌ی زمانی برآورد نشده است. هدف از این پژوهش محاسبه‌ی یک شاخص آلودگی تلفیقی و تهیه‌ی نقشه‌ی تلفیقی آلودگی به نیترات و فسفر برای آبخوان شهرکرد بر اساس یک روش تعدیل‌شده پیشنهادی در محیط جی‌آی‌اس ارزیابی کارایی و سودبخشی این نقشه‌ها در انعکاس آلودگی نسبی نیتراتی و فسفوری، و روند زمانی آلودگی؛ و تقریب سهم و تغییرات سهم نیترات و فسفر در آلودگی توأم آب طی یک دوره‌ی چهارساله (از ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹) در آب زیرزمینی شهرکرد است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخوان مورد نظر در دشت شهرکرد واقع شده است. دشت شهرکرد با امتداد شمال غرب - جنوب شرق در فاصله‌ی بین $32^{\circ} 35'$ تا $32^{\circ} 35'$ عرض شمالی و $50^{\circ} 10'$ تا 51° طول شرقی دارد. نقشه موقعیت دشت شهرکرد و برخی نقاط مهم آن در شکل (۱) نشان داده شده است. مساحت دشت و سرفه شهرکرد ۵۵۱ کیلومتر مربع و سطح حوزه آبریز آن بالغ بر ۱۴۳۵ کیلومتر مربع است (لاله زاری و همکاران، ۱۳۸۸). میانگین سالانه بارش در این دشت ۳۳۷ میلی‌متر و میانگین سالانه درجه حرارت ۱۱/۵ درجه‌ی سلسیوس است (فتحی، ۱۳۹۰).

نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه برداری سال ۱۳۸۵ از ۷۸ حلقه چاه طی ۱۵ روز در مرداد و نمونه برداری سال ۱۳۸۹ از ۹۷ حلقه چاه سه بار در تیر، شهریور و آبان (هر بار در طی کمتر از ۱۰ روز) انجام شد (در این جا از میانگین این سه بار نمونه‌برداری استفاده شده است). موقعیت

1- G.I.S

2- Babiker et al.

3- Machiwal et al.

بیگی هرچگانی و فتحی هفشجانی: ترسیم نقشه‌ی تلفیقی آلودگی به نیترات و فسفر در...

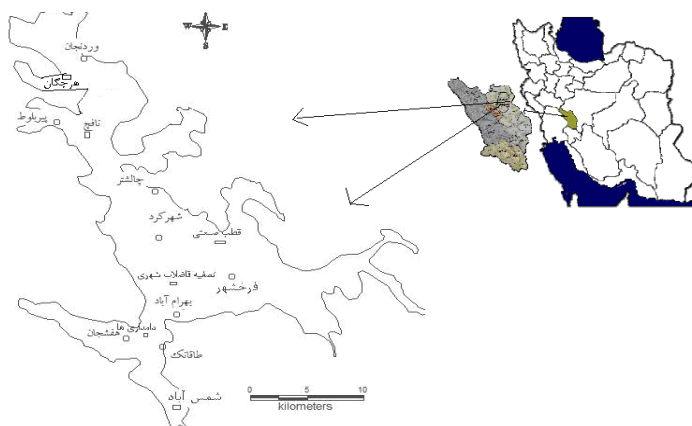
در طی این دوره از تفاضل دو نقشه PI مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ استفاده شد:

$$PI_{N\&P} = (W_{NO_3}R_{NO_3} + W_P R_P) / 2 \quad (3)$$

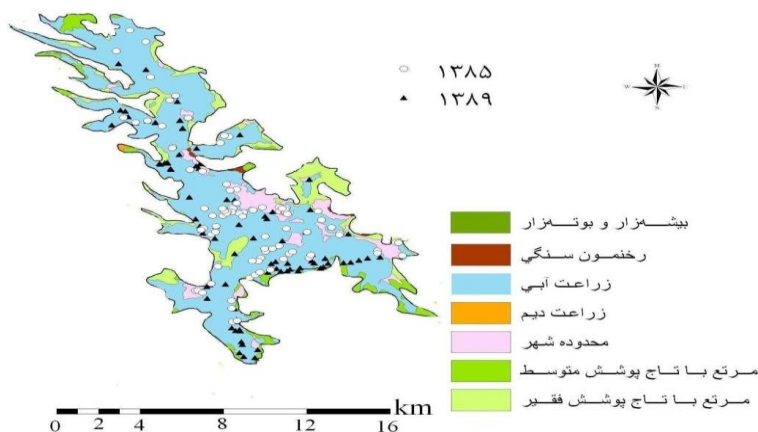
که در آن W_{NO_3} و W_P : به ترتیب وزن نسبی نیترات و فسفر، و R_{NO_3} و R_P : به ترتیب رتبه‌های نیترات و فسفر هستند. مقدار پیکسل‌های نقشه‌ی شاخص تلفیقی بین ۱ تا ۱۰۰ قرار می‌گیرد. هرچه مقدار آن به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد نشانه‌ی آلودگی بیشتر آب زیرزمینی به نیترات و فسفر و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد نشانه‌ی آلودگی کمتر آب زیرزمینی به نیترات و فسفر خواهد بود. نقشه‌ی شاخص تلفیقی برای سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ تهیه و به ترتیب PI_{1385} و PI_{1389} نامیده شدند. به منظور بررسی تغییرات آلودگی

$$PI_{1385} - PI_{1389} = \text{تغییرات آلودگی در طی دوره} \quad (4)$$

پس از مقیاس‌بندی نقشه‌ی تلفیقی آلودگی از ۱ تا ۱۰۰ درصد، گروه‌های کیفی آب در سه کلاس طبقه‌بندی شد. کلیه عملیات ترسیم نقشه و محاسبات نقشه در محیط 9.3 آرک جی ای اس انجام شد.



شکل ۱- نقشه موقعیت دشت شهر کرد (سمت راست) و برخی نقاط مهم در آن (سمت چپ)



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی دشت شهر کرد. موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده با علائم (○ و ▲) نشان داده شده است

جدول ۱- خلاصه آماری نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهرکرد و درصد عدول* از حد مجاز (۲۰۱۱) WHO در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ و درصد افزایش آن‌ها در طی این دوره

مؤلفه	میانه	میانگین	کمینه	دهک اول	بیشینه	دهک آخر	انحراف معیار	حد مجاز	درصد عدول*
میلی گرم در لیتر									
نیترات									
۱۳۸۵	۱۷/۴	۱۷/۹	۵/۹	۶/۹	۴۰/۹	۳/۳	۱/۶	۴۵	۰
۱۳۸۹	۲۵/۵	۲۵/۹	۷/۲	۳/۱	۲/۴۹	۴/۷	۵/۹	۴۵	۳
درصد افزایش	۴۶	۴۵	۲۲	۲۸	۲۰	۴۷			
فسفر									
۱۳۸۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۲	۰
۱۳۸۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲	۰
درصد افزایش	۶۰	۸۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۸	۲۲			

* درصد عدول بیانگر تعداد نمونه آب/چاه است که از بین ۷۸ و یا ۹۷ چاه نمونه‌برداری شده، میانه مؤلفه در آن‌ها از حد مطلوب سازمان بهداشت جهانی (بی نام، ۲۰۱۱) فراتر رفته است.

نتایج و بحث

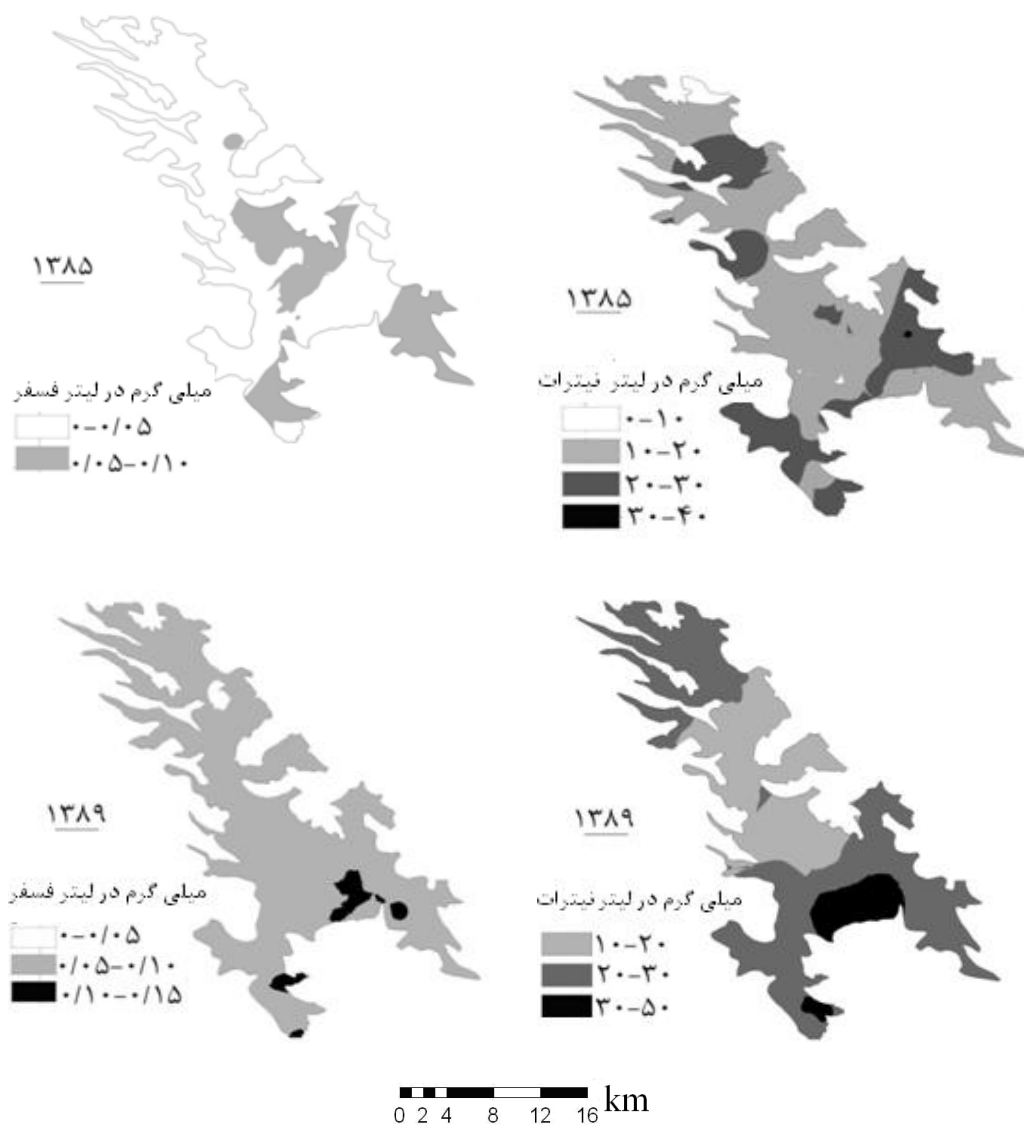
غلظت فسفر ذره‌ای در تمام نمونه‌ها صفر بود. پس تمام فسفر موجود در آب زیرزمینی شهرکرد محلول بود. به عبارت دیگر، در این مقاله، مقادیر فسفر به فسفر محلول یا فسفر کل آب اشاره می‌کند. خلاصه آماری نیترات و فسفر آب زیرزمینی دشت شهرکرد و درصد عدول از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی (بی نام، ۲۰۱۱) در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ در جدول (۱) آمده است. میانه، میانگین، کمینه، بیشینه، دهک اول و دهک آخر غلظت نیترات و فسفر از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ افزایش یافته است (جدول ۱). بیشترین افزایش غلظت نیترات در غلظت‌های بالای آن (دهک آخر) و بیشترین افزایش غلظت فسفر در غلظت‌های پائین آن (دهک اول) رخ داده است. به‌طور میانگین در این مدت، غلظت فسفر در مقایسه با غلظت نیترات افزایش بیشتری داشته است، طوری که افزایش میانه و میانگین فسفر به ترتیب ۱/۳ و ۱/۸ برابر نیترات بوده است. بنابراین در انتهای دوره، ممکن است سهم فسفر در آلودگی آبخوان در مقایسه با سهم نیترات افزایش یافته باشد.

در سال ۱۳۸۹، در سه درصد نمونه‌ها غلظت نیترات از حد ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر فراتر رفت. این در حالی است که در سال ۱۳۸۵ غلظت نیترات هیچ‌گاه از این حد عدول نکرده بود. افزایش انحراف معیار غلظت نیترات از ۶ به ۹/۵، وقتی کمینه آن افزایش یافته، به مفهوم آن است که برخی چاه‌ها از چاه‌های دیگر آلوده‌تر شده‌اند. افزایش شدیدتر بیشینه غلظت نیترات در مقایسه با کمینه‌ی آن (جدول ۱) نیز این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند. علت افزایش آلاینده‌ها در آب زیرزمینی شهرکرد را به افزایش جمعیت شهرکرد در طی سال‌های اخیر، افزایش مصرف شوینده‌ها و افزایش تولید فاضلاب و گسترش دامداری‌های متمرکز به خصوص در بخش‌های جنوبی دشت و خشکسالی در این دوره نسبت داده‌اند (فتحی و بیگی هرچگانی، ۱۳۹۱).

پهنه‌بندی نیترات و فسفر در آب زیرزمینی شهرکرد

در روش فعلی الزامی به تعیین الگوهای تغییرات مکانی نیترات و فسفر و روش‌های زمین‌آماری مثل کریجینگ نیست زیرا نقشه‌های پهنه‌بندی نیترات و فسفر را می‌توان به روش‌های ساده‌تری مثل روش وزن‌دهی معکوس فاصله ترسیم کرد. به‌ویژه این‌که تعیین الگوهای تغییرات مکانی نیترات و فسفر وقتی اندازه‌ی نمونه کافی نباشد ممکن است قانع‌کننده نباشد. با این حال در پژوهش حاضر به دلیل بزرگ بودن اندازه‌ی دو نمونه، از برازش مدل تغییرنما به نیترات و فسفر آب زیرزمینی و روش کریجینگ استفاده شده است زیرا، فتحی (۱۳۹۰) نشان داد که روش کریجینگ برای پهنه‌بندی نیترات و فسفر در آب زیرزمینی شهرکرد بسیار مناسب‌تر از روش وزن‌دهی معکوس فاصله است. وی همچنین نشان داد که مدل کروی تغییرات مکانی نیترات و فسفر در آبخوان شهرکرد را به خوبی توصیف می‌کند و کلاس وابستگی مکانی نیترات و فسفر در این آبخوان قوی است (جزئیات و تعاریف در منبع فتحی (۱۳۹۰) داده شده است). نقشه‌های پهنه‌بندی نیترات و فسفر در آب زیرزمینی شهرکرد که بر اساس مشخصات تغییرنمای کروی مربوط به هر آلاینده و کریجینگ معمولی ترسیم شده‌اند در شکل (۳) دیده می‌شوند. در ابتدا و انتهای دوره، حداکثر آلودگی نیترات و فسفر در نواحی جنوبی آبخوان دیده می‌شود (شکل ۳). این قسمت‌ها شامل فرخ‌شهر، شهر کیان، و روستای بهرام‌آباد هستند (شکل ۱). در برخی از چاه‌های بخش جنوبی غلظت نیترات نزدیک حد مجاز سازمان بهداشت جهانی (بی نام، ۲۰۱۱) و در برخی نیز از حد مجاز فراتر است. علت اصلی آلودگی این بخش از دشت را به شدت بیشتر فعالیت‌های کشاورزی، ورود پساب‌ها به آب‌های زیرزمینی، وجود دام بیشتر و کم عمق بودن سطح ایستابی نسبت داده‌اند (فتحی، ۱۳۹۰). با توجه به این که جهت‌گردایان هیدرولیکی دشت از شمال به جنوب است (میرزایی، ۱۳۸۸) انتقال نیترات از نواحی شمالی به این بخش از آبخوان نیز محتمل است.

بیگی هرچگانی و فتحی هفشجانی: ترسیم نقشه‌ی تلفیقی آلودگی به نیترات و فسفر در...



شکل ۳ - نقشه‌های پهنه‌بندی نیترات (سمت راست) و فسفر محلول (سمت چپ) در سال‌های ۱۳۸۵ (بالا) و ۱۳۸۹ (پایین)

از شدت و توسعه‌ی کمتری برخوردار است (میرزایی، ۱۳۸۸). در قسمت مرکز دشت آلودگی کمتر و آب از کیفیت بالاتری برخوردار است.

تعیین وزن مولفه‌های نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهرکرد

خلاصه‌ی آماری (نقشه‌های) رتبه نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهرکرد در جدول (۲) آمده است. میانگین مقدار عددی پیکسل‌های هر نقشه‌ی رتبه به عنوان وزن مؤلفه در نظر گرفته شد. با توجه به جدول (۲)، کمینه، بیشینه و میانگین رتبه نیترات در آب زیرزمینی شهرکرد در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ بیشتر از آن سفر بوده است که نشان‌دهنده‌ی سهم بیشتر نیترات نسبت به

تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهرکرد در نزدیکی روستای بهرام آباد واقع شده است (شکل ۱) و از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری برای آبیاری مزارع اطراف استفاده می‌شود. از طرف دیگر، اکثر چاه‌های آب این روستا در میان مناطق مسکونی قرار گرفته‌اند. احتمالاً ورود فاضلاب‌های خانگی و پساب شهری به این چاه‌ها سبب افزایش غلظت نیترات و فسفر شده است. آسیب‌پذیرترین بخش آبخوان شهرکرد جنوب شرقی و بخش‌هایی از جنوب غربی است (میرزایی، ۱۳۸۸).

در قسمت جنوب غربی دشت نیز آلودگی نیترات و فسفر نسبتاً بالا است (شکل ۳). در این نواحی فعالیت‌های دامداری شدت دارد. در نواحی شمال غربی دشت آلودگی نسبتاً کم تا کم بود، شاید به دلیل این که تراکم چاه‌ها در قسمت شمال دشت نسبت به جنوب دشت کمتر (شکل ۲) و فعالیت‌های کشاورزی در قسمت شمالی

رتبه‌ی فسفر) می‌توان تقریبی از سهم نیترات و یا فسفر به دست آورد. مثلاً، به طور میانگین، سهم نیترات در سال ۱۳۸۵ حدود ۱/۵ برابر و در سال ۱۳۸۹ حدود ۱/۱ برابر سهم فسفر بوده است که ضمناً حاکی از افزایش سهم فسفر در آلودگی آبخوان با گذشت زمان بوده است. از جدول (۱) استنباط می‌شود که در این دوره، میزان افزایش میانگین غلظت فسفر حدود ۱/۵ برابر افزایش میانگین غلظت نیترات بوده است.

فسفر در آلودگی توام آب زیرزمینی دشت شهرکرد در ابتدا و انتهای این دوره است.

کمینه، بیشینه و میانگین رتبه‌ی (نقشه) نیترات از سال ۱۳۸۵ به سال ۱۳۸۹ اندکی کاهش و برعکس کمینه، بیشینه و میانگین رتبه‌ی (نقشه) فسفر مقداری افزایش نشان می‌دهد که احتمالاً حاکی از افزایش سهم فسفر و در نتیجه کاهش سهم نیترات در آلودگی آب زیرزمینی شهرکرد است. از محاسبه‌ی نسبت هر شاخص آماری (مثلاً نسبت میانگین رتبه‌ی نیترات به میانگین

جدول ۲- خلاصه‌ی آماری نقشه‌های رتبه نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهرکرد در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹

نقشه‌ی رتبه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
نیترات				
۱۳۸۵	۲/۵۰	۴/۶۳	۳/۵۴	۰/۴۲
۱۳۸۹	۲/۳۹	۴/۴۰	۳/۳۶	۰/۴۰
فسفر				
۱۳۸۵	۱/۶۱	۳/۲۲	۲/۳۲	۰/۳۰
۱۳۸۹	۲/۵۳	۳/۸۱	۳/۰۸	۰/۳۱

طوری که کمترین آلودگی در میانه دشت و بیشترین آلودگی در جنوب دشت واقع شده است. این روند با روند کلی آلودگی نیترات و فسفر در طول آبخوان هم‌خوانی دارد (شکل ۳). در نقشه‌های نیترات و فسفر (شکل ۳) هم دیده شد که به طور کلی آلودگی آب بر اساس هر مؤلفه از شمال غربی به سمت جنوب افزایش می‌یافت. بنابراین، نقشه‌ی تلفیقی آلودگی محاسبه شده تا اندازه‌ی زیادی توانسته است که برآیند مؤلفه‌ها را در آبخوان شهرکرد منعکس سازد. به منظور استخراج یک شاخص کمی از این انعکاس، ضریب هم‌بستگی نقشه‌ی تلفیقی با نقشه‌ی نیترات و نقشه‌ی فسفر محاسبه شد. مثلاً نقشه‌ی تلفیقی آلودگی سال ۱۳۸۹، دارای هم‌بستگی بسیار قوی با نقشه‌های منفرد نیترات ($I=0/94$) و فسفر ($I=0/87$) است که حاکی از انعکاس بسیار زیاد توزیع آلودگی نیتراتی و یا فسفوری در نقشه‌ی تلفیقی است. در این میان، هم‌بستگی نقشه‌ی تلفیقی با نقشه‌ی نیترات قوی‌تر از هم‌بستگی آن با نقشه‌ی فسفر است ($p < 0/05$). این نتیجه با نتایج قبلی هم‌خوان است، از جمله طبق جدول (۲)، میانگین رتبه نیترات بیشتر از میانگین رتبه فسفر بوده که حاکی از تأثیر بیشتر نیترات بر آلودگی آبخوان شهرکرد در مقایسه با فسفر است.

کمینه، میانگین و بیشینه نقشه‌ی تلفیقی آبخوان شهرکرد در سال ۱۳۸۵ به ترتیب ۵/۷، ۷/۵ و ۹/۴ و در سال ۱۳۸۹ به ترتیب ۸/۰، ۱۰/۳ و ۱۳/۰ بوده است (شکل ۴). بنابراین، کمینه، میانگین و بیشینه شاخص تلفیقی از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ به ترتیب ۲/۳، ۲/۸ و ۳/۶ درصد افزایش یافته است که حاکی از افزایش کلی آلودگی طی این دوره متناظر با افزایش شاخص‌های آماری آلودگی به نیترات و فسفر (جدول ۱) در این آبخوان است. این افزایش‌ها در (نقشه‌ی) شاخص تلفیقی مترادف با حدود ۵ درصد افزایش

ظاهراً، رتبه‌های یک آلاینده بستگی به توزیع غلظت آن در یک آبخوان دارد؛ مثلاً کمینه، بیشینه و میانگین رتبه نیترات در آبخوان ناسونوی ژاپن (بایبکر و همکاران، ۲۰۰۷) به ترتیب ۱/۷، ۴/۵ و ۳/۲ و در آب زیرزمینی راجستان واقع در غرب هند به ترتیب ۲، ۶/۶۴ و ۴/۵۸ به دست آمد (ماچیوال و همکاران، ۲۰۱۱). آماره‌های رتبه‌ی نیترات در ناسونو تا اندازه‌ی زیادی و آماره‌های رتبه‌ی نیترات در راجستان تا اندازه‌ای به آماره‌های رتبه‌ی حاصل در این پژوهش نزدیک است.

کمینه، بیشینه و میانگین رتبه فسفر از سال ۱۳۸۵ به سال ۱۳۸۹ افزایش نشان می‌دهد که شاید حاکی از افزایش سهم فسفر بر کیفیت آب طی دوره‌ی مورد مطالعه باشد. در حالی که کمینه، بیشینه و میانگین رتبه نیترات از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ ظاهراً اندکی کاهش یافته و احتمالاً سهم نیترات بر آلودگی آبخوان نیز اندکی کاهش یافته باشد. این تغییر سهم با درصد افزایش هر آلاینده (جدول ۱) هم‌خوان است. در پژوهشی در آبخوان شهرکرد طی یک دوره پنج ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰) میانگین و میانه غلظت فسفر سه برابر شد که از میزان افزایش در میانگین و میانه غلظت نیترات بیشتر بود (فتحی و بیگی هرچگانی، ۱۳۹۱). به نظر می‌رسد رویکرد روش حاضر بتواند در تشخیص سهم هر آلاینده و تغییرات دوره‌ای آن مفید باشد.

نقشه‌های تلفیقی

نقشه‌های تلفیقی آلودگی سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ آب زیرزمینی شهرکرد به نیترات و فسفر در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴)، آلودگی آبخوان دشت شهرکرد در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ روند تقریباً مشابهی را نشان می‌دهد به

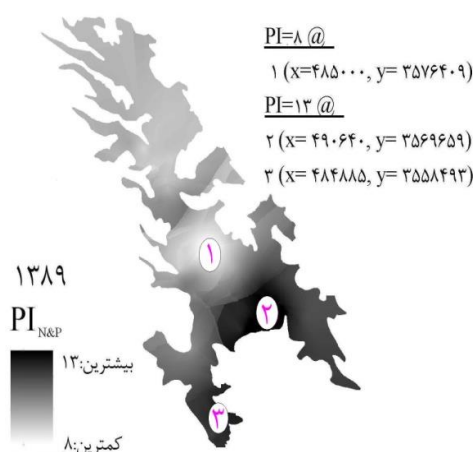
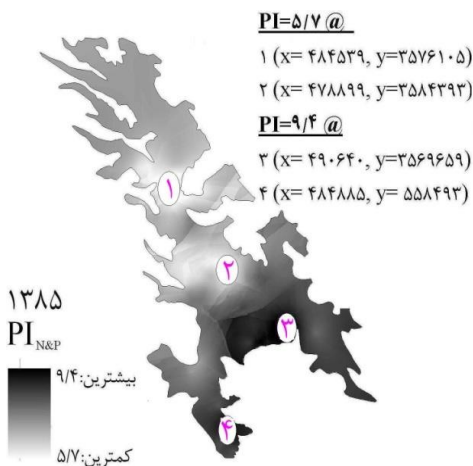
بیگی هرچگانی و فتحی هفشجانی: ترسیم نقشه‌ی تلفیقی آلودگی به نیترات و فسفر در...

مقادیر مثبت کمینه، میانگین و بیشینه در نقشه تفاضل (شکل ۵) به ترتیب برابر با ۲، ۲/۸ و ۴ است که نشان‌دهنده‌ی روند افزایشی آلودگی آب زیرزمینی شهرکرد به نیترات و فسفر طی سال های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ است. مقادیر حاصل از این رویکرد (نقشه‌ی تفاضل) با مقادیر حاصل از مقایسه‌ی دو نقشه تلفیقی همساز و به یک دیگر نزدیک است. با این حال رویکرد استفاده از نقشه‌ی تفاضل توصیه می‌شود زیرا در شرایط مختلف جواب واقعی‌تر خواهد بود.

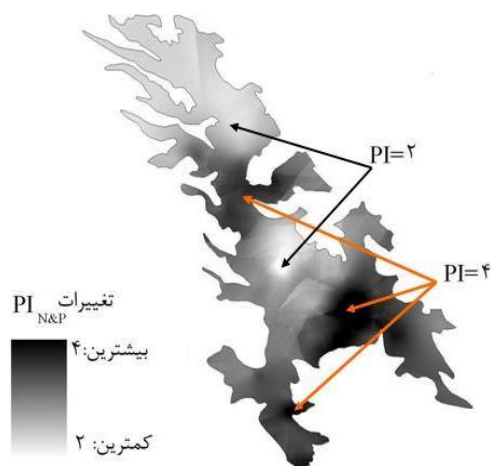
با توجه به شکل (۵)، کمترین مقادیر تغییر در مرکز و شمال دشت مشاهده می‌شود که آن هم معادل با حداقل ۲ درصد افزایش آلودگی است. بیشترین افزایش آلودگی در نواحی جنوب غربی و جنوب شرقی دشت مشاهده می‌شود. در بررسی تغییرات غلظت نیترات و فسفر طی یک دوره پنج ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹) در آبخوان دشت شهرکرد مشخص شد که شدت آلودگی دو آلاینده نیترات و فسفر از سال ۱۳۸۵ به ۱۳۸۹ و به ۱۳۹۰ افزایش یافت و مساحت پهناهای آلوده‌تر به نیترات و فسفات (غلظت بیشتر) زیاد شد. بیشترین آلودگی در بخش جنوبی و کمترین آلودگی آب در قسمت میانه دشت گزارش شد (فتیحی و بیگی هرچگانی، ۱۳۹۱).

آلودگی نیتراتی و فسفوری طی این دوره است. افزایش انحراف معیار از ۰/۸ به ۱/۵ درصد حاکی از آلوده‌تر شدن نقاط آلوده‌تر در طی همین دوره است.

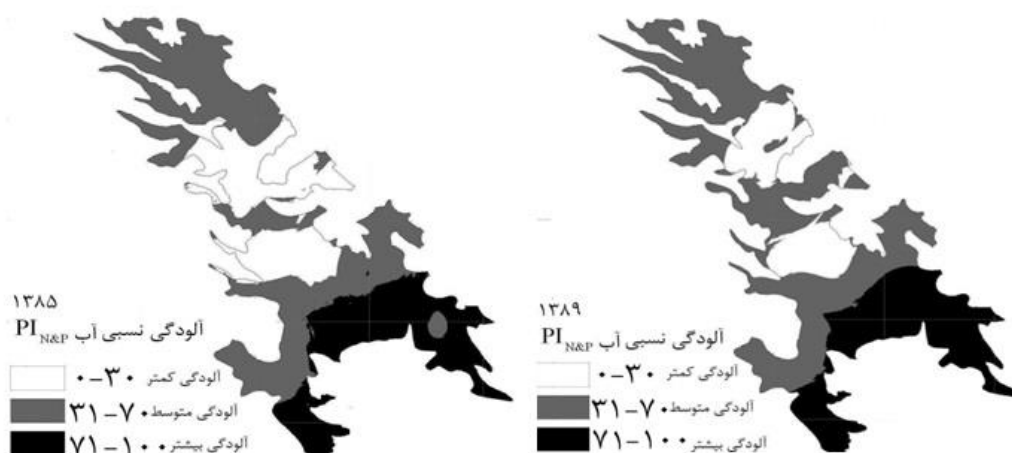
از آنجایی که مقادیر کمینه، میانگین و بیشینه در هر نقشه‌ی تلفیقی ممکن است در مختصات جغرافیائی مختلف (نقاط یا بخش‌های متفاوت آبخوان) رخ دهند (شکل ۴)، مقایسه‌ی دو به دوی مقادیر آن‌ها در ابتدا و انتهای دوره (آن‌طور که در بالا انجام شد) ممکن است منعکس‌کننده تغییرات دقیق یک نقطه در طی دوره نباشد. در عوض، مقایسه‌ی نقطه به نقطه (در واقع پیکسل به پیکسل) دو نقشه جواب صحیح‌تری تأمین خواهد کرد. از این رو، به منظور بررسی کمی و دقیق‌تر تغییرات آلودگی توأم به نیترات و فسفر طی دوره‌ی چهارساله از تفاضل دو نقشه PI در سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ استفاده شد. طبق رابطه‌ی (۴)، مثبت بودن مقادیر نقشه‌ی حاصل (و نیز میانگین، کمینه و بیشینه آن) نشانه‌ی افزایش PI و افزایش آلودگی؛ و منفی بودن مقادیر نقشه‌ی تفاضل، نشانه‌ی کاهش PI و کاهش آلودگی طی دوره‌ی زمانی است. قدر مطلق مقدار هر نقطه در نقشه تفاضل متناسب با شدت افزایش و یا کاهش آلودگی در آن نقطه است. به عبارت دیگر، مقدار مثبت بزرگ‌تر نشانه‌ی کاهش بیشتر شاخص تلفیقی و افزایش بیشتر آلودگی است.



شکل ۴- نقشه‌های تلفیقی آلودگی آب زیرزمینی به نیترات و فسفر (و تغییرات مقدار مطلق شاخص تلفیقی) در سال های ۱۳۸۵ (چپ) و ۱۳۸۹ (راست) بر اساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (بی نام، ۲۰۱۱).



شکل ۵- میزان افزایش شاخص تلفیقی آلودگی در آبخوان شهرکرد از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۸۹



شکل ۶- نقشه‌های تلفیقی آلودگی به نیترات و فسفر در سال‌های ۱۳۸۵ (چپ) و ۱۳۸۹ (راست) که ابتدا مقیاس بندی و سپس به سه بازه آلودگی آب تقسیم شده‌اند

جدول ۳- تغییرات درصد پوشش و مساحت پهنه‌های آلودگی نسبی آب (بر اساس شاخص تلفیقی نیترات و فسفر) از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹

تغییر مساحت (کیلومتر مربع)	درصد پوشش آبخوان		الودگی نسبی آب	شاخص تلفیقی مقیاس بندی شده (درصد)
	تغییر*	سال ۱۳۸۹		
۱۱۱/۰ (افزایش)	۲/۰ درصد افزایش	۳۵/۴	۳۳/۴	۷۱-۱۰۰ درصد
۳/۱۸ (افزایش)	۳/۳ درصد افزایش	۴۹/۸	۴۶/۵	۳۱-۷۰ درصد
۲۹/۳ (کاهش)	۵/۳ درصد کاهش	۱۴/۸	۲۰/۱	۰-۳۰ درصد

* درصد تغییر پوشش که از تفریق درصد پوشش سال ۱۳۸۵ از درصد پوشش سال ۱۳۸۹ به دست آمده است.

(مقادیر درصد ۰ - ۳۰) در مرکز دشت و اطراف شهر شهرکرد واقع شده و کلاس با آلودگی بیشتر (درصد ۷۱-۱۰۰) جنوب دشت را پوشش داده است و آلودگی متوسط (درصد ۳۱-۷۰) در جنوب دشت حفاصل آلوده‌ترین پهنه و پهنه‌ی با کمترین آلودگی واقع

برای نشان دادن آلودگی نسبی آب زیرزمینی شهرکرد به نیترات و فسفر هر نقشه‌ی تلفیقی بر اساس شاخص تلفیقی در محدوده‌ی صفر تا ۱۰۰ مقیاس بندی و به سه بازه‌ی تقسیم شده است (شکل ۶). در ابتدا و انتهای دوره، کلاس با آلودگی کمتر

آلاینده در این آبخوان است. تحلیل هم‌بستگی نیز این تصور را تایید کرد.

ب) مقایسه‌ی نقشه‌های شاخص تلفیقی در ابتدا و انتهای دوره‌ی چهارساله آشکار ساخت که مقدار شاخص تلفیقی افزایش یافته است و این نشان دهنده‌ی افزایش آلودگی یا افت کیفیت آب، احتمالاً در اثر ورود و نشت نیترات و فسفر، به آبخوان شهرکرد در طی این دوره است. در نقشه‌ی تفاضل چهارساله، حداقل مقدار شاخص تلفیقی حدود ۲ بود که نشان می‌دهد در تمام نقاط آبخوان آلودگی توام نیترات و فسفر افزایش یافته است. بایستی توجه داشت که مقدار مطلق شاخص آلودگی تلفیقی محاسبه شده چندان مد نظر نیست زیرا روش به کار رفته به ویژه نحوه‌ی رتبه‌بندی (معادله‌ی ۲) اختیاری بوده و می‌تواند به صورت‌های دیگر نیز انجام گیرد و به مقادیر دیگر منجر شود با این حال، مقادیر این شاخص آلودگی ارزش مقایسه‌ای فراوانی دارد. این مقایسه می‌تواند در دو سطح صورت گیرد: مقایسه‌ی آلودگی نقاط آبخوان با هم (تشخیص آلودگی نسبی-بند (الف) همین بخش)؛ و مقایسه‌ی آلودگی یک نقطه جغرافیایی در دوره‌های مختلف زمانی (تشخیص روند آلودگی-بند (ب) همین بخش). به علاوه، رویکرد حاضر قادر است تغییرات سهم نسبی هر یک از دو آلاینده را در آلودگی آبخوان نشان دهد.

بنابراین، به کارگیری روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، یعنی محاسبه‌ی شاخص تلفیقی آلودگی و ترسیم نقشه‌ی آن در محیط جی‌آی‌اس، قادر است آلودگی توأم نسبی آبخوان و روند تغییرات زمانی آلودگی را به صورت کمی‌تری آشکار سازد. توسعه‌ی بیشتر این روش در تهیه نقشه‌ی تلفیقی آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات و فسفر برای ارزیابی احتمال رشد جلبکی و پیامدهای آن (گرفتگی لوله‌های آبیاری کم‌فشار، تغییر بو و طعم آب و هزینه‌های تصفیه) توصیه می‌شود.

شده است (شکل ۶). به طور کلی، از جنوب دشت به شمال غربی از آلودگی نیتراتی و فسفوری کاسته می‌شود. از مقایسه‌ی صورتی نقشه‌های شکل (۶) دریافت می‌شود که مهم‌ترین تغییر در آلودگی آب زیرزمینی شهرکرد در طی این دوره آلوده‌تر شدن آب شمال غربی آبخوان و وسیع‌تر شدن پهنه‌ی آلودگی متوسط آب در این آبخوان است. برای مقایسه‌ی کمی، درصد پوشش کلاس‌های نقشه‌های تلفیقی آلودگی مقیاس‌بندی شده در جدول ۳ داده شده است. با توجه به جدول (۳)، از سال ۱۳۸۵ به ۱۳۸۹، معادل ۵/۳ درصد از پهنه‌ی کمتر آلوده (آب بهتر) کاسته شده و به ازای آن به مقدار ۳/۳ درصد به مساحت کلاس با کیفیت متوسط (۷۰-۳۱ درصد) و ۲ درصد به مساحت پهنه ۱۰۰-۷۱ یعنی کلاس با کیفیت پایین‌تر افزوده شده است.

محاسبه درصد و مساحت پهنه‌های آلوده به نیترات و فسفر در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ در آب زیرزمینی دشت شهرکرد نشان داد که در سال ۱۳۸۹ نسبت به سال ۱۳۸۵ از درصد و مساحت کلاس‌ها با آلودگی کمتر کاسته شده و به درصد و مساحت کلاس‌ها با آلودگی بیشتر افزوده شد (فتحی و بیگی ۱۳۹۱). بنابراین نتایج تحلیل تلفیقی فعلی با نتایج تحلیل جداگانه‌ی نیترات و یا فسفر در همان بازه‌ی زمانی همخوان بوده ولی افق جدیدتری را برای دیریت این دو آلاینده می‌گشاید.

نتیجه‌گیری

الف) نقشه‌ی تلفیقی آلودگی همانند نقشه‌های منفرد نیترات و فسفر نشان داد که عموماً به طرف جنوب دشت بر غلظت مؤلفه‌ها و آلودگی آب افزوده می‌شود و در مرکز و شمال دشت آب از کیفیت بالاتری نسبت به سایر نقاط دشت برخوردار است. به نظر می‌رسد روش به کار رفته حاضر در ترسیم نقشه‌ی تلفیقی آلودگی بر اساس دو آلاینده‌ی نیترات و فسفر برای آبخوان شهرکرد مناسب باشد زیرا قادر به انعکاس تغییرات مؤلفه‌های

منابع

- ۱- استواری، ی.، بیگی، ح. و ع. داودیان. ۱۳۹۱. بررسی تغییرات مکانی نیترات در آب زیرزمینی دشت لردگان. مدیریت آب و آبیاری. ۱(۲): ۶۷-۵۵.
- ۲- بی‌نام. ۱۳۸۸. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب آشامیدنی. استاندارد ۱۰۵۳۳، تجدید نظر پنجم، ۱۸ صفحه.
- ۳- فتحی، ا. ۱۳۹۰. اعتباریابی مدل‌های دراستیک و سینتکس به منظور تعیین آسیب‌پذیری آبخوان دشت شهرکرد یا استفاده از تغییرات فصلی غلظت‌های نیترات و فسفر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته خاکشناسی، دانشگاه شهرکرد، ۱۳۰ صفحه.
- ۴- فتحی، ا. و ح. بیگی هرچگانی. ۱۳۹۲. بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهرکرد طی یک دوره پنج ساله. مجله علوم آب و خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۷(۶۵): ۷۴-۶۳.
- ۵- لاله‌زاری، ر.، طباطبایی، س. ح. 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): ۱۷-۹.
- ۶- میرزایی، س. ۱۳۸۸. ارزیابی آسیب‌پذیری و تهیه نقشه‌های خطر آلودگی آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از GIS و مدل‌های DRASTIC و SINTACS. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته خاکشناسی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ۱۷۰ صفحه.

- 7- Anonymous. 1998. Standard methods for examination of water and wastewater. 20th Edition, American Public Health Association Inc. Washington, USA.
- 8- Anonymous. 2011. Guidelines for drinking water quality. Vol. 1: Recommendations (3rd edition), Geneva.
- 9- Babiker, I., Mohamed A. and T. Hiyama. 2007. Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21:699–715.
- 10- Camberato, D. M. and R. G. Lopez. Controlling algae in irrigation ponds. *Purdue Horticulture and Landscape Architecture, Purdue University Extension*.
- 11- Hemilton, P.A. and D.R. Helsel. 1995. Effect of agriculture on groundwater quality in five regions of the United States. *Groundwater Journal*, 33:217-226.
- 12- Machiwal, D., Jha, M. K. and B. C. Mal. 2011. GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174:645–663
- 13- Merrington, G. 2002. *Agricultural pollution: Environmental problems and practical solutions*. Taylor and Francis, 243 p.
- 14- Rao, N. S. and P. R. Prasad. 1997. Phosphate pollution in the groundwater of lower Vamsadhara river basin, India. *Environmental Geology*, 31:117-122.
- 15- Zhang, W.L., Tian Z.X., Zhang N. and X.Q. Li. 1996. Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 59(3):223-231.