

## مقایسه چند روش درون‌یابی مکانی و انتخاب مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد

الهام فتحی هفشجانی<sup>۱</sup>، حبیب‌الله بیگی هرچگانی<sup>۲</sup>، علیرضا داودیان دهکردی<sup>۳</sup>، سید حسن طباطبایی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت ۱۳۹۲/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۰۵

مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

### چکیده

انتخاب و به کارگیری روش درون‌یابی مناسب می‌تواند منجر به تولید نقشه‌هایی دقیق‌تر و صحیح‌تر گردد. هدف از انجام این پژوهش تعیین مناسب‌ترین روش درون‌یابی از بین انواع کریجینگ، وزن دهی معکوس فاصله (با توان ۱ تا ۴) و انواع کوکریجینگ جهت پهنه‌بندی و نقشه‌کشی مولفه‌های نیترات و فسفات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد بود. برای این منظور از داده‌های غلظت نیترات و فسفات ۹۷ حلقه چاه کشاورزی دشت شهرکرد استفاده شد: در روش کریجینگ معمولی نیترات، مقدار  $R^2$  حداقل ۰/۹۹،  $RMSE < 1 \text{ mg/L}$  و  $ME < 0/1 \text{ mg/L}$  و در پهنه‌بندی فسفات به روش کریجینگ معمولی مقدار  $R^2$  نزدیک به واحد،  $RMSE = 0/01$  و  $ME$  نزدیک به صفر به دست آمد. کارآیی روش وزن دهی معکوس فاصله در پهنه‌بندی نیترات و فسفات ضعیف‌تر از کریجینگ بود و با افزایش توان روش معکوس فاصله مقدار  $R^2$  کاهش و مقدار  $RMSE$  افزایش یافت. با این حال توان ۱ معکوس فاصله را در شرایطی می‌توان جایگزین کریجینگ کرد. در پهنه‌بندی نیترات یا فسفات روش کوکریجینگ با استفاده از یکدیگر به عنوان متغیر کمکی ارزش هزینه آن را ندارد. نقشه‌های حاصل از ویژگی‌های تغییر نمای منتخب و روش کریجینگ معمولی برای نیترات و فسفات نشان داد میزان آلودگی آب زیرزمینی شهرکرد به این دو آلاینده از شمال به جنوب دشت روبه افزایش است. همخوانی خلاصه‌ی آماری مشاهدات با خلاصه‌ی آماری نقشه‌ها که به روش کریجینگ تولی شده بودند دقت خوب این روش را نشان داد. در مجموع استفاده از روش کریجینگ معمولی به دلیل دقت بیشتر، محاسبات کمتر و نیاز به داده کمتر در بین روش‌های مقایسه شده، برای پهنه‌بندی نیترات و فسفات آب زیرزمینی شهرکرد توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: واریوگرام، کریجینگ ساده و معمولی، کوکریجینگ ساده و معمولی، وزن‌دهی معکوس فاصله.

۱ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران، ۰۹۱۳۳۸۳۹۹۴۸، Elhamfathi2012@yahoo.com

۲ استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران، ۰۹۱۳۱۸۲۱۰۰۹، beigi.habib@gmail.com

۴ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران، ۰۹۱۳۱۸۱۲۸۰۸، Alireza.davoudian@gmail.com

۴ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران، ۰۹۱۳۳۲۶۸۸۴۰، stabaei@hotmail.com

## مقدمه

وجود تغییرات مکانی امری طبیعی می‌باشد، ولی شناخت این تغییرات جهت برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت امری لازم و مفید است. از آنجا که آمار کلاسیک قادر به در نظر گرفتن توزیع مکانی مولفه‌های کیفیت آب‌های زیرزمینی نیست، از زمین‌آمار بعنوان تکنیکی برای این هدف استفاده می‌گردد (نظری زاده و همکاران ۱۳۸۵). مثلاً، فلیپو و همکاران (۲۰۰۷) با نمونه‌گیری از ۲۴۳ حلقه چاه به ارزیابی آلودگی نیتراتی در آبخوان گرند مارین در فرانسه، به وسعت ۲۷۰۰ کیلومتر مربع پرداختند. مدل واریوگرام کروی با دامنه تأثیر ۲۰۰۰۰ متر بهترین برازش را برای غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی داشت. اویان و کی (۲۰۱۰) برای پهنه‌بندی غلظت نیترات آب زیرزمینی شهر قونیه واقع در ترکیه از روش کریجینگ استفاده کردند. داده‌های غلظت نیترات آب زیرزمینی از یک مدل واریوگرام کروی پیروی کرده و دارای وابستگی مکانی متوسطی (۰/۶۰) بودند. بر اساس نقشه توزیع مکانی آلودگی نیترات در آب زیرزمینی بیشترین غلظت نیترات در مرکز شهر احتمالاً به دلیل وجود مراکز صنعتی بود.

مطالعات چندی به بررسی روش‌های مختلف درون‌یابی مکانی جهت انتخاب بهترین درون‌یاب برای پهنه‌بندی نیترات در آب‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. مثلاً، دیگوستینو و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی نیترات به کمک روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در آب‌های زیرزمینی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش کوکریجینگ باعث افزایش دقت در برآورد غلظت نیترات شده است. بارکا و پاسارلا (۲۰۰۷) برای تهیه نقشه نیترات در دو حد آستانه ۱۰ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، در دشت موندای ایتالیا از دو روش کریجینگ گسسته و شبیه‌سازی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ گسسته روش مناسبی جهت بررسی میزان نیترات آب زیرزمینی می‌باشد.

نجاتی جهرمی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی زمین‌آماري توزیع نیترات در آبخوان آبرفتی دشت عقیلی پرداختند. درون‌یابی بین داده‌های نیترات با استفاده از درون‌یاب‌های مختلف کریجینگ و همچنین با استفاده از روش وزن دهی عکس فاصله با توان‌های مختلف انجام گرفت. بررسی نتایج تجزیه‌ی شیمیایی توسط روش‌های

مختلف زمین‌آماري نشان داد که مدل کروی به عنوان بهترین مدل برازش شده بر مشاهدات بوده و کریجینگ معمولی بهترین درون‌یاب جهت بررسی مکانی نیترات محلول در آبخوان دشت عقیلی می‌باشد.

فتانی و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت‌های کشاورزی تریفیفا در شمال شرق مراکش از نظر غلظت نیترات آمونیوم از روش کریجینگ معمولی برای مطالعه و پهنه‌بندی نقشه کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده نمودند.

اوسطی و سلاجقه (۱۳۸۹) از روش درون‌یاب کریجینگ معمولی به عنوان بهترین روش درون‌یاب برای پهنه‌بندی نیترات در آب زیرزمینی دشت کردان استفاده کردند.

با این حال، به نظر می‌رسد منبع منتشر شده‌ای در مورد بررسی تغییرات مکانی فسفات در آب زیرزمینی وجود ندارد ولی در مطالعه‌ای 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 (استواری، ۱۳۹۰).

در برخی از مطالعات هم از روش کریجینگ استفاده شده است که به نظر می‌رسد نرم افزار مورد استفاده احتمالاً مدلی را به مشاهدات فسفات برازش داده و نقشه ترسیم شده است در حالی که صحت و دقت مدل تعیین‌نا مورد بررسی قرار نگرفته است. از این نمونه مطالعات می‌توان به تحقیق میرزایی (۱۳۸۸) اشاره کرد.

تاکنون در پهنه‌بندی مولفه‌های کیفی آب زیرزمینی از روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده شده است. به نظر می‌رسد، روش مناسب درون‌یابی مولفه‌های کیفی آب زیرزمینی وابسته به مکان باشد و بایستی برای هر آبخوان جداگانه صورت گیرد. تاکنون هیچ مطالعه‌ای برای تعیین بهترین روش پهنه‌بندی مولفه‌های نیترات و فسفات آب‌های زیرزمینی منطقه شهرکرد که از دشت‌های مهم کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری بشمار می‌رود صورت نگرفته است. هدف از این مطالعه (۱) تعیین مناسب‌ترین روش درون‌یابی از بین انواع کریجینگ، کوکریجینگ و وزن دهی معکوس فاصله (با توان ۱ تا ۴) جهت پهنه‌بندی مولفه‌های نیترات و فسفات آب زیرزمینی

بین  $32^{\circ}07'$  تا  $32^{\circ}33'$  عرض شمالی و  $50^{\circ}38'$  تا  $51^{\circ}10'$  طول شرقی قرار دارد. بزرگترین آبادی این دشت، شهرکرد با ارتفاع حدود ۲۰۶۰ متر از سطح دریا در بخش شمال دشت قرار دارد. سطح حوزه آبریز این دشت بالغ بر  $1135/57$  کیلومترمربع است (میرزایی ۱۳۸۸).

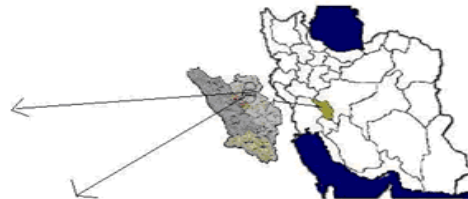


دشت شهرکرد؛ و (۲) تهیه نقشه‌های این مولفه‌ها در سفره آب شهرکرد بر مبنای مناسب‌ترین روش است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

آبخوان مورد نظر در دشت شهرکرد واقع شده است. دشت شهرکرد با امتداد شمال غرب - جنوب شرق در



شکل (۱): نقشه موقعیت دشت شهرکرد (سمت راست) موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده با علامت (●) نشان داده شده است (سمت چپ)

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

### انتخاب مدل تغییرنمای مناسب

تعیین مدل تغییرنمای پیش نیاز استفاده از برخی روش‌های درون‌یابی و پهنه‌بندی از جمله انواع کریجینگ و انواع کوکریجینگ است. مشخصه‌های واریوگرام مشتعل بر دامنه تأثیر، سقف و اثر قطعه‌ای می‌باشد (رضایی و همکاران، ۱۳۸۹). از بین مدل‌های تئوری واریوگرام که به مشاهدات نیترات و فسفات برازش داده شد، بهترین مدل‌ها کروی و گوسی بودند. مشروح روش و نتایج در فتحی و بیگی (۱۳۹۱) آمده است.

آبخوان دشت شهرکرد یکی از بزرگترین آبخوان‌های استان چهارمحال و بختیاری بوده و از لحاظ تامین آب کشاورزی و آب شرب منطقه دارای اهمیت زیادی می‌باشد. این دشت از نظر زمین ریخت‌شناسی یک دشت میان‌کوهی بوده و حدفاصل دو رشته کوه موازی با روند شمال غرب - جنوب شرق محصور شده است. سنگهای آهکی کرتاسه قل و نقاط مرتفع این رشته کوهها را تشکیل می‌دهند و مهمترین منابع تغذیه کننده رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی دشت می‌باشند. 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 (میرزایی ۱۳۸۸).

### نمونه برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه از میانگین نتایج چهارنوبت نمونه‌برداری ۹۷ حلقه چاه (تیر، شهرپور و آبان) در سال ۱۳۸۹ و خرداد در سال ۱۳۹۰ استفاده شده است. موقعیت جغرافیایی چاه‌ها با GPS ثبت گردید. نمونه‌های آب در

### روش‌های میان‌یابی کریجینگ، روش کوکریجینگ و روش معکوس فاصله (IDW)<sup>۳</sup>

روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ بر اساس تعریف واریوگرام استوار بوده و موفقیت روش به انتخاب مدل مناسب یا بهینه‌ی واریوگرام بستگی دارد (تقی‌زاده-مهرجردی و همکاران، ۲۰۰۸). از واریوگرام، برای محاسبه وزن در روش کریجینگ استفاده می‌شود. معادله اساسی کریجینگ به شکل زیر است:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i \quad (1)$$

که در آن:  $F(x, y)$  مقدار تخمین زده شده شاخص در نقطه‌ای با مختصات  $x$  و  $y$ ؛  $n$  تعداد نقاط اندازه‌گیری شده؛  $w_i$  وزن نسبت داده شده به نقطه  $i$ ؛ و  $f_i$  مقادیر شاخص در نقطه اندازه‌گیری  $i$  است (۱۰). مقدار وزن از طریق مدل واریوگرام تأمین می‌شود.

روش کوکریجینگ یک حالت چند متغیره از کریجینگ است که بر اساس هم‌بستگی موجود بین متغیر اصلی و سایر متغیرهای اندازه‌گیری شده که در اصطلاح متغیر کمکی یا ثانویه نامیده می‌شوند، به تخمین متغیر مورد نظر می‌پردازد. این ویژگی می‌تواند باعث دقت بیشتر تخمین و صرفه‌جویی در هزینه‌ها (مثلاً از طریق کاهش نمونه‌برداری یا اندازه‌گیری متغیر اصلی) شود. تخمین‌گر کوکریجینگ هرگاه یک متغیر کمکی علاوه بر متغیر اصلی موجود باشد، مطابق معادله-ی زیر محاسبه می‌شود (اربطانی و همکاران، ۱۳۸۸):

$$Z_v^*(u_0) = \sum_{i=1}^n [a_i \cdot Z_v(u_i) + \beta_i \cdot Z_w(u_i)] \quad (2)$$

که در آن  $Z_v^*(u_0)$  مقدار تخمین زده شده متغیر اصلی  $Z_v$  در موقعیت  $u_0$ ،  $a_i$ ، وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده‌ای متغیر اصلی  $Z_v$  در موقعیت  $u_i$ ،  $\beta_i$  وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده شده متغیر کمکی  $Z_w$  در موقعیت  $u_i$  و  $n$  تعداد مشاهدات در اطراف نقطه مورد تخمین می‌باشد (اربطانی و همکاران، ۱۳۸۸):

در روش معکوس فاصله (IDW)<sup>۴</sup> نیازی به تعیین الگوی تغییرات مکانی یعنی تغییرنا نیست. معکوس فاصله یک روش وزن‌دهی متوسط بوده که در آن داده‌ها از طریق رابطه انحراف معیار یک نقطه از سایر نقاط با استفاده از گره‌های شبکه‌بندی شده، وزن‌دهی می‌شوند (تقی‌زاده مهرجردی و همکاران، ۲۰۰۸). در این روش وزن‌ها تنها با توجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به نحوه پراکندگی نقاط حول نقطه مورد تخمین، تعیین می‌شوند. به نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتر و به نقاط دورتر وزن کمتری داده می‌شود (دلبری و همکاران، ۱۳۸۹). معادله این روش به شکل زیر است:

$$\lambda_i = \frac{D^{-\pi}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\pi}} \quad (3)$$

که در آن:  $D_i$  فاصله  $i$  امین نقطه مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین؛  $\pi$  توان وزن‌دهی فاصله و  $n$  تعداد نقاط مجاور است (دلبری و همکاران، ۱۳۸۹). با افزایش توان روش معکوس فاصله مقدار  $R^2$  کاهش و مقدار  $RMSE$  افزایش می‌یابد.

برای مقایسه دقت روش‌های درون‌یاب کریجینگ، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله با توان‌های ۱ تا ۴ از شاخص‌های  $R^2$ ،  $ME$  و  $RMSE$  استفاده شد. همچنین برای ارزیابی مدل‌های واریوگرام معیارهای زیر محاسبه شدند:

$$ME = \sum_{j=1}^n \frac{X(p)_j - X(m)_j}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X(p)_j - X(m)_j)^2}{n}} \quad (5)$$

با استفاده از معادله ۴، معیار سوم:  $\%RMSE$  حساب

شد:

$$\%RMSE = \left( \frac{RMSE}{\bar{X}} \right) \times 100 \quad (6)$$

## بحث و نتایج

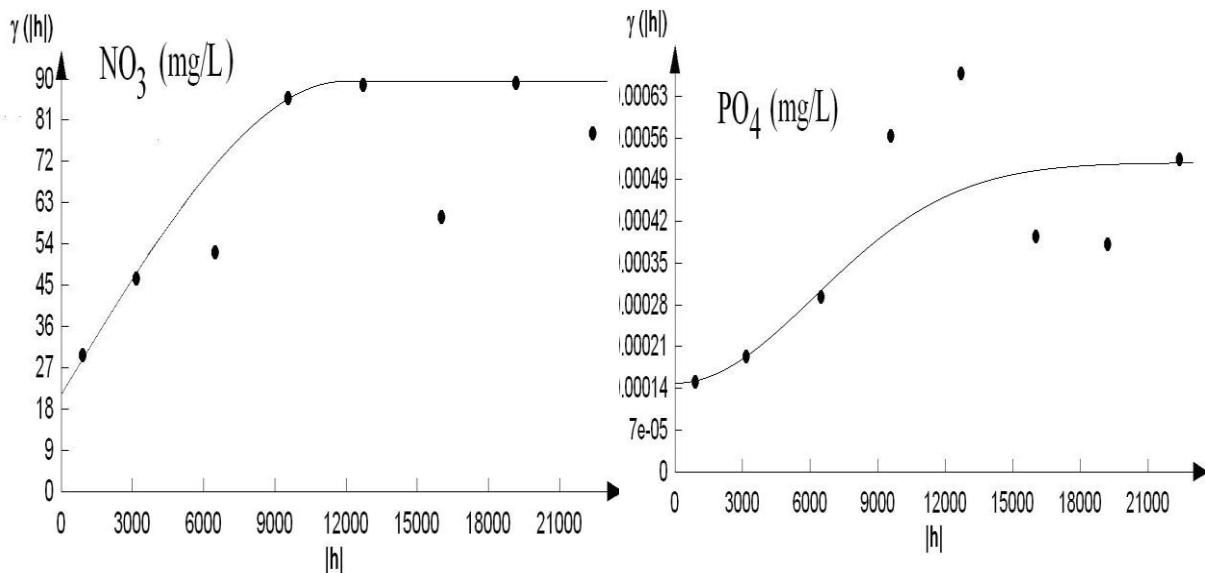
### پردازش واریوگرامها

شکل ۲ واریوگرامهای تجربی و شکل ۳ واریوگرام متقابل برازش داده شده به نیترات و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد را نشان می‌دهد. مدل واریوگرام مناسب برای نیترات کروی و برای فسفات گوسی به دست آمد. مقدار همبستگی نیترات و فسفات در این مطالعه ۰/۶۱ بود که نسبتاً قوی است (تقی‌زاده مهرجردی و همکاران، ۱۳۸۷)، به همین دلیل، مدل‌های واریوگرام متقابل نیترات و فسفات به منظور به کارگیری روش کوکریجینگ برازش شد و بهترین مدل: گوسی به دست آمد (شکل ۴). جدول ۱ نتایج مربوط به تحلیل واریوگرامهای نیترات و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد را نشان می‌دهد. نتایج کامل‌تر مربوط به تحلیل‌های مکانی و واریوگرامهای مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد در فتنی و بیگی (۱۳۹۱) آورده شده است.

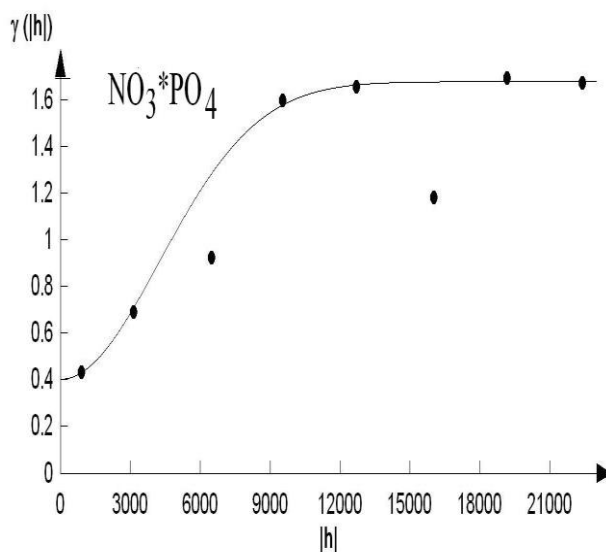
که در آن‌ها،  $ME$ : میانگین خطا،  $RMSE$ : ریشه میانگین مربعات خطا،  $X(p)$ : مقادیر برآورد شده هر مولفه کیفی آب،  $X(m)$ : مقادیر اندازه‌گیری شده هر مولفه کیفی آب،  $n$ : تعداد نمونه‌ها و  $\bar{X}$ : میانگین هر مولفه اندازه‌گیری شده است

معیار  $RMSE$  نسبت به داده‌های پرت حساس است، به همین دلیل می‌توان از  $RMSE\%$  استفاده کرد. کوچکتر بودن این معیار، دلیلی بر دقت بالاتر تخمین‌ها و یا اختلاف کم بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده است. حد قابل قبول  $RMSE\%$  ۴۰ و  $RMSE\%$  بالاتر از ۷۱ درصد به معنی عدم دقت در نظر گرفته شده است (هنگل و همکاران، ۲۰۰۴).

نرمال بودن توزیع داده‌ها که از شرایط استفاده از واریوگرام است با استفاده از آزمون کلموگراف-اسمیرنف بررسی شد. بهترین مدل واریوگرامها تعیین و محاسبه مربوط به روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ، و وزن‌دهی معکوس فاصله با استفاده از  $GS+9$  صورت گرفت. پهنه‌بندی و نقشه‌های توزیع مکانی مؤلفه‌ها در محیط ArcGIS 9.2 محصول شرکت ESRI Inc, (2008) ترسیم شد.



شکل (۲): واریوگرامهای تجربی و برازش داده شده به نیترات و فسفات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد



شکل (۳): واریوگرام متقابل نیترات و فسفات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد

جدول (۱): نتایج مربوط به پردازش و تحلیل دقت واریوگرام‌های شاخص‌های آلاینده‌ی آب زیرزمینی دشت شهرکرد (به نقل از فتحی و بیگی (۱۳۹۱))

ویژگی	مدل	دامنه تأثیر (متر)	آستانه تأثیر (C <sub>0</sub> +C)	اثر قطعه‌ای (C <sub>0</sub> )	$\frac{C_0}{C_0+C}$	کلاس وابستگی مکانی	ME	RMSE	%RMSE
نیترات	کروی	۱۱۹۴۶	۹۶/۴	۲۱/۴	۰/۲۲	قوی	۰/۰۴	۵/۱۰	۲۲
فسفات	گوسی	۱۵۱۸۰	۰/۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۱۵۲	۰/۴۱	نسبتاً قوی	۰/۰۰	۰/۰۱	۱۱
نیترات*فسفات	گوسی	۱۰۸۱۰	۱/۶۹۴	۰/۴۲	۰/۲۴	قوی	۰/۰۰۴	۰/۶۲	۱۵

فسفات بیشتر از ۰/۲۵ است، که هم‌بستگی مکانی نسبتاً قوی را نشان می‌دهد.

#### مقایسه روش‌های میان‌یابی کریجینگ، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله

مقدار هم‌بستگی نیترات و فسفات ۰/۶۱ شد. از این رو در روش کوکریجینگ از نیترات به عنوان متغیر کمکی برای فسفات و از فسفات به عنوان متغیر کمکی برای نیترات در حالت ۴ (جدول ۳) استفاده شد. حالت اول: متغیر اصلی در ۹۷ حلقه چاه و متغیر کمکی نیز در همان ۹۷ حلقه چاه؛ حالت دوم: متغیر اصلی در ۵۰ حلقه چاه و متغیر کمکی در همان ۵۰ حلقه چاه به اضافه ۴۷ چاه دیگر؛ حالت سوم: متغیر اصلی در ۵۰ حلقه چاه و متغیر کمکی در ۵۰ حلقه چاه دیگر؛ حالت چهارم: متغیر اصلی در ۵۰ حلقه چاه و متغیر کمکی در ۴۷ حلقه چاه دیگر بررسی شد.

با توجه به جدول ۱، نیترات از مدل واریوگرام کروی و فسفات از مدل واریوگرام گوسی پیروی کرد. اوپان و کی (۲۰۱۰) در قونیه ترکیه و فیلیپو و همکاران (۲۰۰۷) در آبخوان گراند مارین فرانسه هم به داده‌های نیترات مدل واریوگرام کروی را برازش دادند. استواری (۱۳۹۰) در دشت لردگان استان چهارمحال و بختیاری به این نتیجه رسید که مشاهدات فسفات از مدل واریوگرام خاصی پیروی نمی‌کند. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه‌ی تأثیر شاخصی از قدرت ساختار مکانی متغیرهاست. چنانچه این نسبت کمتر از ۰/۲۵ شود نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی خواهد بود (کامبردلا و همکاران ۱۹۹۴). در آبخوان شهرکرد، متوسط نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه‌ی تأثیر  $(C_0/C_0+C)$  برای نیترات کمتر از ۰/۲۵ است که نشان‌دهنده‌ی وابستگی قوی مکانی در محدوده‌ی دامنه‌ی تأثیر آن است و برای

های نیترات و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مقادیر  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $ME$  حاصل اعمال روش‌های کریجینگ ساده و معمولی، کوکریجینگ ساده و معمولی، و  $IDW$  با توان‌های ۱ تا ۴ در تخمین مولفه-

جدول (۲): آماره‌های  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $ME$  حاصل اعمال روش‌های کریجینگ و  $IDW$  با توان‌های ۱ تا ۴ در تخمین نیترات و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد

مولفه	روش‌های درون‌یابی	$R^2$	$RMSE$	$ME$
$NO_3^-$	کریجینگ ساده	۰/۹۹۹	۰/۱۱	۰/۰۷
	کریجینگ معمولی	۰/۹۹۹	۰/۱۵	۰/۰۵
	$IDW$ با توان ۱	۰/۹۷۳	۱/۳۵	۰/۷۴
	$IDW$ با توان ۲	۰/۹۶۳	۱/۵۶	۰/۶۰
	$IDW$ با توان ۳	۰/۹۴۶	۱/۹۱	۰/۴۹
	$IDW$ با توان ۴	۰/۹۲۹	۲/۱۹	۰/۴۸
$PO_4^{2-}$	کریجینگ ساده	۰/۸۹۰	۰/۰۰۳۸	-۰/۰۰۵
	کریجینگ معمولی	۰/۹۹۹	۰/۰۱	۰/۰۰۰
	$IDW$ با توان ۱	۰/۹۶۷	۰/۰۰۳۸	-۰/۰۰۵
	$IDW$ با توان ۲	۰/۹۳۳	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۷
	$IDW$ با توان ۳	۰/۸۷۱	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۴
	$IDW$ با توان ۴	۰/۷۶۳	۰/۰۱۲۱	-۰/۰۰۲

جدول (۳): آماره‌های  $ME$ ،  $RMSE$  و  $R^2$  در روش درون‌یابی کوکریجینگ در حالت‌های مختلف برای نیترات و فسفات در آب زیرزمینی شهرکرد

مولفه	کوکریجینگ	متغیر اصلی	متغیر کمکی	$R^2$	$ME$	$RMSE$
$NO_3^-$	ساده	نیترات در ۹۷ چاه	فسفات در همان ۹۷ چاه	۰/۹۹۰	۰/۰۹	۰/۸۱
	معمولی			۰/۹۹۹	۰/۰۸	۰/۰۳
	ساده	نیترات در ۵۰ چاه	فسفات در ۹۷ چاه (همان ۵۰ چاه+۴۷ چاه دیگر)	۰/۸۷۶	۰/۰۲	۰/۹۸
	معمولی			۰/۸۷۳	۰/۰۱	۰/۷۷
	ساده	نیترات در ۵۰ چاه	فسفات در ۵۰ چاه دیگر	۰/۸۹۰	۰/۰۵	۱/۰۳
	معمولی			۰/۸۸۸	۰/۰۰۹	۱/۰۰
$PO_4^{2-}$	ساده	نیترات در ۵۰ چاه	فسفات در ۹۷ چاه	۰/۸۲۰	۰/۲۴	۱/۵۷
	معمولی			۰/۸۱۸	۰/۱۹	۱/۴۵
	ساده	فسفات در ۹۷ چاه	چاه نیترات در همان ۹۷ چاه	۰/۸۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	معمولی			۰/۸۳۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	ساده	فسفات در ۵۰ چاه	نیترات در ۹۷ چاه (همان ۵۰ چاه+۴۷ چاه دیگر)	۰/۰۴۸	-	-
	معمولی			۰/۰۴۲	-	-
ساده	فسفات در ۵۰ چاه	نیترات در ۵۰ چاه دیگر	نیترات در ۵۰ چاه دیگر	۰/۹۱۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴
	معمولی			۰/۹۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	ساده	فسفات در ۵۰ چاه	نیترات در ۴۷ چاه دیگر	۰/۹۴۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
	معمولی			۰/۹۴۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵

فسفات روش کریجینگ معمولی روش مناسبی باشد. دیگوستینو و همکاران (۱۹۹۸) نیز کریجینگ را بهترین

به نظر می‌رسد با توجه به مقادیر  $ME$ ،  $RMSE$  و  $R^2$  در جدول‌های ۲ و ۳ برای پهنه بندی نیترات و

نقشه‌های پهنه‌بندی نیترا و فسفات روند مشابهی را نشان می‌دهند (شکل ۴). آلودگی نیتراتی و فسفاتی در شمال غربی آبخوان کمترین و در بخش جنوبی و جنوب شرقی به حداکثر می‌رسد. بایستی توجه داشت که اکثر صنایع و دامداری‌های فشرده در بخش جنوبی و جنوب شرقی واقع است. موقعیت شهرکرد و تصفیه‌خانه آن نیز به آلودگی در بخش جنوبی دامن می‌زند.

در برخی از چاه‌های بخش جنوبی غلظت نیترا بیشتر از حد استاندارد ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر است. لاله-زاری (۱۳۸۷) و میرزایی (۱۳۸۸) نیز به این نتیجه رسیدند که در قسمت جنوبی دشت مقدار آلودگی نیتراتی بیشتر از قسمت‌های دیگر دشت است. علت اصلی آلودگی این بخش از دشت را می‌توان به شدت بیشتر فعالیت‌های کشاورزی، ورود پساب‌ها به آب‌های زیرزمینی، وجود دام بیشتر و کم عمق بودن سطح ایستابی نسبت داد. با توجه به این که جهت گرادیان هیدرولیکی از شمال دشت به قسمت‌های جنوبی است (میرزایی ۱۳۸۸)، انتقال نیترا از نواحی دیگر (شمالی) به این بخش از آبخوان را نیز می‌توان محتمل دانست.

تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهرکرد در نزدیکی روستای بهرام آباد واقع شده است (شکل ۱). 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 نیترا و فسفات شده است. میرزایی (۱۳۸۸) هم آسیب‌پذیرترین بخش سفره شهرکرد را جنوب شرقی دشت و بخش‌هایی از جنوب غربی دشت دانسته است.

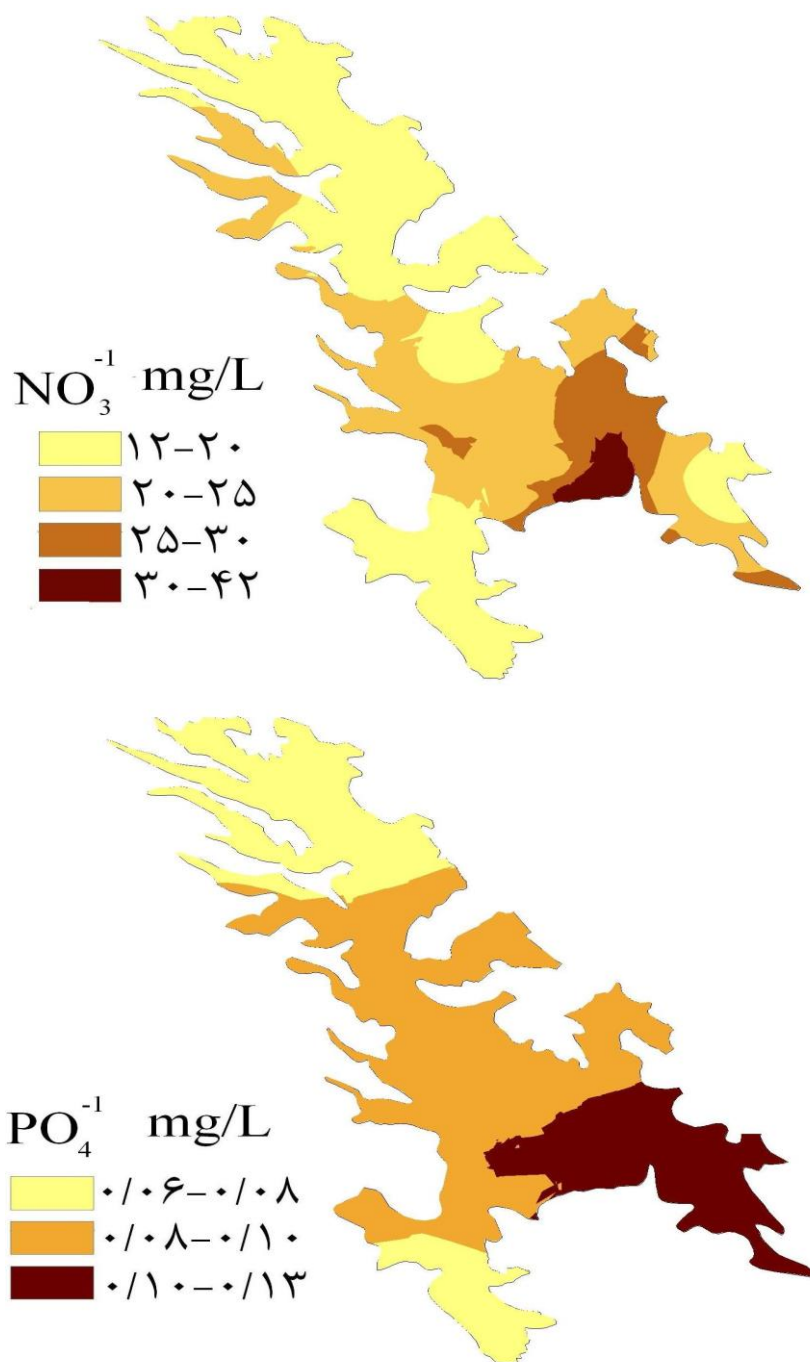
روش در برآورد غلظت نیترا معرفی کردند. بارکا و پارسارلا (۲۰۰۷) نشان دادند روش کریجینگ گسسته روشی مناسب جهت تخمین میزان نیترا آب زیرزمینی می‌باشد. نجاتی جهرمی و همکاران (۱۳۸۸) کریجینگ معمولی را بهترین روش درون‌یاب جهت بررسی مکانی نیترا محلول در آبخوان دشت عقیلی معرفی کردند.

اگر چه روش معکوس فاصله در این دشت برای پهنه‌بندی نیترا و فسفات به خوبی روش کریجینگ نیست ولی می‌توان روش معکوس فاصله با توان ۱ را جایگزین خوبی برای کریجینگ دانست. در روش معکوس فاصله با افزایش توان از ۱ تا ۴ مقدار  $R^2$  برای هر دو مولفه نیترا و فسفر تقریباً کاهش دارد (جدول ۲). این در حالی است که مقدار  $RMSE$  با افزایش توان روند افزایشی دارد (جدول ۲). به عبارت دیگر با افزایش توان در روش معکوس فاصله از دقت و صحت درون‌یابی این روش کاسته می‌شود. کوکریجینگ معمولی فقط در برآورد نیترا، آن هم وقتی اندازه‌گیری فسفات در تمام چاه انجام شده باشد، اندک بهبودی نسبت به کریجینگ معمولی عرضه می‌کند ولی اگر اندازه‌گیری فسفات مورد نظر نباشد ارزش هزینه‌ی اضافی اندازه‌گیری را ندارد.

### پهنه‌بندی

نقشه‌های توزیع یک متغیر می‌تواند در نحوه‌ی مدیریت آب یا مدیریت کاربرد آن مفید واقع شود. نقشه‌های پهنه‌بندی نیترا و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد هر دو بر اساس کریجینگ معمولی و با استفاده از مدل تغییرنمای مناسب هر یک در شکل ۴ نشان داده شده است.





شکل (۴): پهنه‌بندی نیترات و فسفات آب زیرزمینی دشت شهرکرد

یا دقت بیشتری برخوردار است. جدول‌های ۴ و ۵ به ترتیب درصد و مساحت هر پهنه و خلاصه آماری مولفه‌های نیترات و فسفات را بر اساس مشاهدات نشان می‌دهند.

#### ارزیابی روش‌های زمین آماری به کار رفته

هر چه آماره‌ها و یا اطلاعات حاصل از یک نقشه به آماره‌های مبتنی بر مشاهدات نیترات و یا فسفات نزدیک‌تر باشند به آن معنی است که روش‌های پهنه‌بندی (مدل تغییرنما و روش درون‌یابی) به کار گرفته شده از صحت و

جدول (۴): درصد و مساحت پهنه‌های آلوده به نیترات و خلاصه آماری برای غلظت نیترات در هر پهنه بر اساس مشاهدات در آب

زیرزمینی شهرکرد

بازه (mg/L)	درصد پوشش (%)	مساحت (km <sup>2</sup> )	تعداد چاه	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار (%)	ضریب تغییرات
								(%)
۱۲-۲۰	۴۷/۱	۲۵۹/۵	۳۹	۱۵/۳	۷/۵	۲۰/۰	۳/۳	۲۱/۹
۲۰-۲۵	۳۵/۵	۱۹۵/۴	۲۱	۲۲/۳	۲۰/۲	۲۴/۷	۱/۳	۵/۷
۲۵-۳۰	۱۵/۱	۸۳/۲	۱۶	۲۷/۱	۲۵/۳	۲۹/۹	۱/۲	۴/۴
۳۰-۴۲	۲/۳	۱۲/۸	۲۱	۳۴/۶	۳۰/۶	۴۲/۰	۲/۷	۷/۸

جدول (۵): درصد و مساحت پهنه‌های آلوده به فسفات و خلاصه آماری برای غلظت فسفات در هر پهنه بر اساس مشاهدات در آب

زیرزمینی شهرکرد

بازه (mg/L)	درصد پوشش (%)	مساحت (km <sup>2</sup> )	تعداد چاه	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار (%)	ضریب تغییرات
								(%)
۰/۰۶-۰/۰۸	۲۷/۱	۱۴۹/۵	۲۴	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۰۶	۸/۶
۰/۰۸-۰/۱۰	۴۴/۷	۲۴۶/۴	۳۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۰۵	۵/۵
۰/۱۰-۰/۱۲	۲۸/۱	۱۵۵	۴۰	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۰۹	۷/۵

که روش درون‌یاب کریجینگ معمولی به خوبی عمل کرده و از دقت بالایی برخوردار است. جدول‌های ۶ و ۷ به ترتیب خلاصه آماری نیترات و فسفات را بر اساس نقشه و مشاهدات نشان می‌دهد. مقایسه خلاصه آماری مشاهدات نیترات و فسفات (جدول ۷) با خلاصه آماری به دست آمده از نقشه‌های این دو مولفه (جدول ۶) نشان می‌دهد که میانگین، کمینه و بیشینه مولفه‌های نیترات و فسفات از هر دو روش تقریباً نزدیک به هم است. همخوانی خلاصه آماری مشاهدات و نقشه‌ها حاکی از صحت روش درون‌یاب کریجینگ معمولی است.

با توجه به جدول ۴ کمینه و بیشینه غلظت نیترات (به غیر از کلاس ۱۲-۲۰) بر اساس مشاهدات در هر پهنه نزدیک به کمینه و بیشینه غلظت آن بر اساس نقشه می‌باشد. هم‌چنین در این جدول بیشترین میانگین مشاهدات نیترات مربوط به پهنه‌ی ۳۰-۴۲ میلی‌گرم بر لیتر است و بیشترین ضریب تغییرات نیز مربوط به کلاس ۱۲-۲۰ میلی‌گرم بر لیتر است که پراکندگی بیشتر مشاهدات را در این پهنه نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۵ هم کمینه و بیشینه فسفات بر اساس مشاهدات و بر اساس نقشه در هر پهنه نزدیک به هم است. ضریب تغییرات کلاس ۰/۰۶-۰/۰۸ بیشتر است چون مشاهدات در این پهنه پراکنش بیشتری نسبت به سایر پهنه‌ها دارند. نتایج جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد

جدول (۶): خلاصه آماری غلظت نیترات و فسفات بر اساس نقشه در آبخوان دشت شهرکرد

نوبت نمونه برداری	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
					(%)
نیترات	۲۱/۱	۱۲/۵	۳۶/۳	۴/۱	۱۹
فسفات	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۰۱۴	۱۵

جدول (۷): خلاصه آماری غلظت نیترات و فسفات بر اساس مشاهدات در آب زیرزمینی شهرکرد

نوبت نمونه برداری	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
	mg/L				(%)
نیترات	۲۲/۲	۷/۵	۴۲	۸/۳	۳۷
فسفات	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۲۲

## نتیجه گیری

فسفات نشان داد که در قسمت‌های شمالی دشت از لودگی کمتر و قسمت‌های جنوبی از آلودگی بیشتری برخوردارند. در قسمت‌های جنوبی به دلیل فاضلاب‌های شهری، روستایی، صنعتی و کشاورزی و همچنین وجود تصفیه‌خانه نیز در جنوب دشت احتمالاً عاملی بر افزایش مقدار این آلاینده‌ها است.

با توجه به مقادیر  $R^2$  و  $RMSE$  و  $ME$  روش کریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی نیترات و فسفات مناسب‌تر از سایر روش‌ها بود. همخوانی خلاصه آماری حاصل از نقشه‌ها با مقادیر مشاهداتی نشان‌دهنده‌ی تناسب روش کریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی نیترات و فسفات در این آبخوان بود. نقشه‌های پهنه‌بندی نیترات و

## منابع

۱. اربطانی، و.، ع. احمدی و م.م. فتاحی. ۱۳۸۸. مدل‌سازی تغییرات مکانی برخی از ویژگی‌های شیمیایی آب‌های زیرزمینی به کمک روش‌های زمین‌آماري. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری، ۳ (۷): صفحات ۲۳-۴۵.
۲. استواری، ی. ۱۳۹۰. ارزیابی کیفیت آب آبخوان‌های منطقه لردگان و تاثیر سازندهای زمین شناسی بر کیفیت این آبخوان‌ها. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ۱۱۰ ص.
۳. اوسطی، خ. و ع. سلاجقه. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مکانی نیترات در آب زیرزمینی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: دشت کردان). ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۸ و ۹ اردیبهشت، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی پردیس بین الملل دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور، ۸ صفحه.
۴. تقی‌زاده مهرجردی، ر.، م. زارعیان‌چهرمی، ش. محمودی، ا. حیدری و ف. سرمیدان. ۱۳۸۷. بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری، ۲ (۵): صفحات ۶۴-۷۲.
۵. دلبری، م.، پ. افراسیاب و س.ر. میرعمادی. ۱۳۸۹. تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی - زمانی شوری و عمق آب زیرزمینی (مطالعه موردی: استان مازندران). نشریه‌ی آبیاری و زهکشی ایران، ۴ (۳): ۳۵۹-۳۷۴.
۶. 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.
۷. رضائی، ع. و ع.ل. میرمحمدی. ۱۳۸۴. آمار و احتمالات (کاربرد در کشاورزی). انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان چاپ اول، ۵۸۶ صفحه.
۸. فتحی، ا. و ح. بیگی هرچگانی. ۱۳۹۱. بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی نیترات و فسفر آب زیرزمینی شهرکرد طی یک دوره پنج ساله. مجله علوم آب و خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان، پذیرفته شده، ۱۶ ص.
۹. لاله‌زاری، ر. و س.ح. طباطبائی. ۱۳۸۹. خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی دشت شهرکرد. محیط شناسی، سال سی و ششم، شماره ۵۳، بهار ۱۳۸۹. ۸ صفحه.
۱۰. میرزایی، س. ۱۳۸۸. ارزیابی آسیب پذیری و تهیه نقشه‌های خطر آلودگی آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از GIS و مدل‌های DRASTIC و SINTACS. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ۱۷۰ ص.

۱۱. نجاتی جهرمی، ز، م. چیت‌سازان و ی. میرزایی. ۱۳۸۸. بررسی زمین آماری توزیع نیترات در آبخوان آبرفتی دشت عقیلی (شمال شهرستان شوشتر در استان خوزستان) در محیط GIS. مجموعه مقالات شانزدهمین همایش ژئوماتیک تهران، سازمان نقشه برداری کشور. ۲۳ - ۲۰ اردیبهشت. ۹ ص.
۱۲. نظری‌زاده، ف، ب. ارشادیان و ک. زندوکیلی. ۱۳۸۵. بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بالارود در استان خوزستان. مجموعه مقالات اولین همایش منطقه‌ای بهره برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده رود (فرصتها و چالشها). دانشگاه شهرکرد، صفحات ۱۲۳۶-۱۲۴۰. ۱۴ و ۱۵ شهریور.
13. APHA. 1998. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th Edition. American Public Health Association Inc. Washington, USA.
14. Barca, E. and G. Passarella,. 2007. Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation. A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation, Environ Monit Assess, (in press).
15. 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.
16. Data P.S. Deb D.L. and S.K. Tygi 1997. Assessment of groundwater contamination from fertilizers in the Delhi area based on  $O^{18}$ ,  $NO_3$  and K composition. Journal of Contaminant Hydrology, 27: 249-262.
17. Dagostino, V., E.A. Greene, B. Passarella and, G. Vurro. 1998. Spatial and temporal study of nitrate concentration in groundwater by means of coregionalization. Environmental geology. 36:285-295.
18. ESRI Inc. 2008. Arc GIS™. Version 9.3. [www.esri.com](http://www.esri.com).
19. Fetouani, S., M. Sbaa, M. Vanclooster and B. Bendra. 2008. Assessing groundwater quality in the irrigated plain of Triffa (North-east Morocco). Journal of Agricultural Water Management 95: 133-142.
20. 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. Environmental Pollution, 146: 241-256.
21. Handa B.K. 1990. Contamination of groundwater by phosphates. Bhujal News, 5: 24-36.
22. 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.
23. Hengel T., G.B.M. Huvelink and A. Stein .2004. A generic framework for spatial prediction of soil variabls based on regression-kriging. Geoderma , 120:75-93.
24. Mehrjerdi R., M. Zareian, Sh. Mahmodi and A. Heidari. 2008. Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (Case study: Yazd-Ardakan plain). World Applied Science Journal. 4(1): 9-17.
25. StatSoft Inc. 2008. STATISTICA (data analysis software system).Version 8. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
26. Pannatier, Y. 1998. Variowin: software for data analysis in 2D.Version 2.21. Springer Verlag. 93 pages.
27. Scott, D.H. 2000. Soil physics, Agricultural and environmental applications. Iowa State University Press. Ames, Iowa. 410 pages.
28. Smith, P.C. and G. Schrale. 1982. Proposed rehabilitation of an aquifer contaminated with cheese factory wastes. AWAA Water, 9(1):21-24.
29. U.S. EPA. 1995. Quality criteria for water. EPA 440/5-86-001. USEPA, Washington.
30. Uyan, M. and T. Cay. 2010. Geostatistical methods for mapping groundwater nitrate concentrations. 3rd International conference on cartography and GIS, 12-20 June, 2010, Nessebar, Bulgaria.

## Comparison of spatial interpolation methods and selecting the appropriate method for mapping of nitrate and phosphate in the Shahrekord Aquifer

### abstract

Selecting appropriate interpolation method can lead to the production of more accurate maps. The aim of this study was to determine the appropriate method of interpolation and mapping for nitrate and phosphate in the Shahrekord Aquifer from the methods: kriging, co-kriging and inverse distance weighting. For this purpose, the concentrations of nitrate and phosphate were measured in 97 agricultural wells. For both nitrate and phosphate, the ordinary kriging was appropriate and enough. For nitrate, ordinary kriging resulted in  $R^2 = 0.99$ ,  $RMSE < 1$  mg / L and  $ME < 0.1$  for nitrate; and  $R^2$  close to the unity,  $RMSE = 0.01$  and  $ME$  close to zero for phosphate. Efficiency of the inverse distance weighting method was weaker than kriging and its efficiency statistic further deteriorated by increasing its exponent from 1 to 5. However, this method is a good alternative for kriging. Co-kriging did not improve the interpolation over kriging and therefore, is not worth the costs and efforts involved. Maps showed that the concentrations of both pollutants increased from the northwestern to the southwestern part of the aquifer. Examination of conformity of observations statistical summary to maps further indicated the applied kriging was appropriate. In general, using ordinary kriging is recommended for mapping of nitrate and phosphate in the Shahrekord Aquifer, due to higher accuracy, less calculation and less required data.

**Key words:** Simple and ordinary Kriging, Inverse distance weighting, Variogram.