

هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۳، صص ۹۲-۷۵

وصول مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۱۶ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۲

ارزیابی انواع روش‌های درون‌یابی، جهت تخمین آلودگی نترات در منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت بیلوردی، استان آذربایجان شرقی)

عطاالله ندیری^۱

صدیقه شکور^۲

اصغر اصغری مقدم^۳

میثم ودیعتی^۴

چکیده

امروزه استفاده از روش‌های درون‌یابی برای تخمین متغیرهای فضایی در علوم آب، بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. با توجه به اهمیت اطلاع از وضعیت کیفیت آبهای زیرزمینی برای مصارف مختلف و همچنین زمان‌بر و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در کل دشت، یافتن راهکاری برای تخمین آنها در دیگر مناطق دشت، امری ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش ارزیابی انواع روش‌های درون‌یابی جهت بررسی و تحلیل مکانی غلظت یون نترات و انتخاب بهترین روش درون‌یابی در دشت بیلوردی است. بدین منظور در مهر ماه ۱۳۹۲، تعداد ۱۵ نمونه برداشته شدند و در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز مورد آنالیز قرار گرفتند. محدوده مطالعاتی با وسعت ۲۸۹ کیلومترمربع در ۴۵ کیلومتری شمال شرق تبریز قرار دارد و از نظر هیدروژئوژیکی از زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه محسوب می‌شود. در این دشت از انواع روش‌های درون‌یابی شامل معکوس فاصله (IDW)، تابع شعاعی (RBF)، تخمین‌گر عام (GP)، تخمین‌گر موضعی (LP)، کریجینگ (K) و کوگریجینگ (CoK) در محیط نرم‌افزار Arc Map، برای پیش‌بینی مقادیر نترات استفاده کردیم. مقادیر RMSE و نمودارهای رگرسیون حاصل از درون‌یابی نشان داد که روش تخمین‌گر موضعی با تابع چندجمله‌ای درجه ۳ بهترین روش برای درون‌یابی توزیع یون نترات در دشت بیلوردی است.

واژه‌های کلیدی: دشت بیلوردی؛ آبهای زیرزمینی؛ نترات؛ درون‌یابی؛ کریجینگ

مقدمه

آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند ایران که متوسط بارندگی کمتر از متوسط بارندگی در سایر نقاط کره زمین است، اهمیت زیادی دارد. بنابراین آلوده شدن منابع آب زیرزمینی تهدیدی جدی در این مناطق بوده و مدیریت کاربری اراضی باید متناسب با پتانسیل و خطر آلوده شدن آبخوان‌ها تعریف گردد. در بعضی از موارد فرایندهای طبیعی به‌طورجدی سبب آلودگی می‌شوند اما بیشتر نگرانی‌های بشر در مورد آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی بر اثر فعالیت‌های انسانی است. عمده‌ترین و شایع‌ترین آلاینده منابع آب شرب یون نیترات است که منابع مهم تولید آن، تجزیه و فساد پسماندهای انسانی و حیوانی، فاضلاب‌های شهری و صنعتی، کودهای حیوانی و شیمیایی و زهاب حاصل از کشاورزی هستند (کالویف، ۲۰۰۵). نیتريت حاصل از احیای نیترات باعث بروز بیماری مهم‌مگلوبینا، سیانوزیس نوزادان، بیماری‌های گوارشی و اختلالات تنفسی و سرطانه‌های گوارشی و... می‌شود (جیان‌یو و همکاران، ۲۰۰۷). حداکثر غلظت مطلوب یون نیترات برای مصرف شرب ۱۰ میلی‌گرم در لیتر توصیه گردیده است (WHO, 2006). گاه شرایط زمانی و مکانی و اقتصادی به گونه‌ای است که امکان نمونه‌برداری از تمام منابع آب یک منطقه وجود ندارد. بنابراین بهتر است از روش‌های تخمینی استفاده شود؛ یکی از این روش‌های تخمینی، درون‌یابی است. در خصوص با پیش‌بینی توزیع آلاینده‌های آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های درون‌یابی و نرم‌افزار ArcMap، تحقیقاتی صورت گرفته است به‌طوری که لی و همکاران (۲۰۰۳)، در ارزیابی غلظت نیترات با استفاده از Arc Map به این نتیجه رسیدند که کشاورزی بیشترین تأثیر را در افزایش غلظت نیترات در فصل کم بارش داشته است. زمین آمار به بررسی آن دسته از متغیرهایی می‌پردازد که دارای ساختار مکانی هستند و یا بین مقادیرشان، ارتباط فضایی وجود دارد (حسینی پاک، ۱۳۷۷). گاوس و همکاران (۲۰۰۳)، در بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی بنگلادش از روش کریجینگ گسسته استفاده کرده‌اند. بارسا و پاسارلا (۲۰۰۳)، برای تهیه نقشه خطر نیترات در دشت مودنای ایتالیا دریافتند که روش کریجینگ گسسته روش مناسبی جهت بررسی میزان تخریب آب زیرزمینی است. الماسری و کالواچی (۲۰۰۴)، برای ارزیابی و مدیریت دراز مدت نیترات در آب‌های زیرزمینی تحت زمین‌های کشاورزی از انواع روش‌های درون‌یابی استفاده کردند. احمدی و صدق‌آمیز (۲۰۰۷) در دشت داراب فارس دقت مدل‌های کریجینگ و کوکریجینگ را در تخمین سطح آب زیرزمینی مورد مقایسه قرار داده، بدین نتیجه رسیدند که کوکریجینگ از دقت بیشتری برخوردار است. یون فونگ و همکاران (۲۰۱۱)، برای برآورد آلودگی فلزات سنگین در خاک از روش‌های درون‌یابی معکوس فاصله، تخمین‌گر موضعی، کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص بهره‌جسته‌اند و منطقه را به سه بخش بدون آلودگی، مناطق با آلودگی زیاد و مرزهای آلوده تقسیم کرده‌اند. پوخل و همکاران (۲۰۱۳) برای پیش‌بینی پتانسیل روان‌گرایی خاک از روش‌های

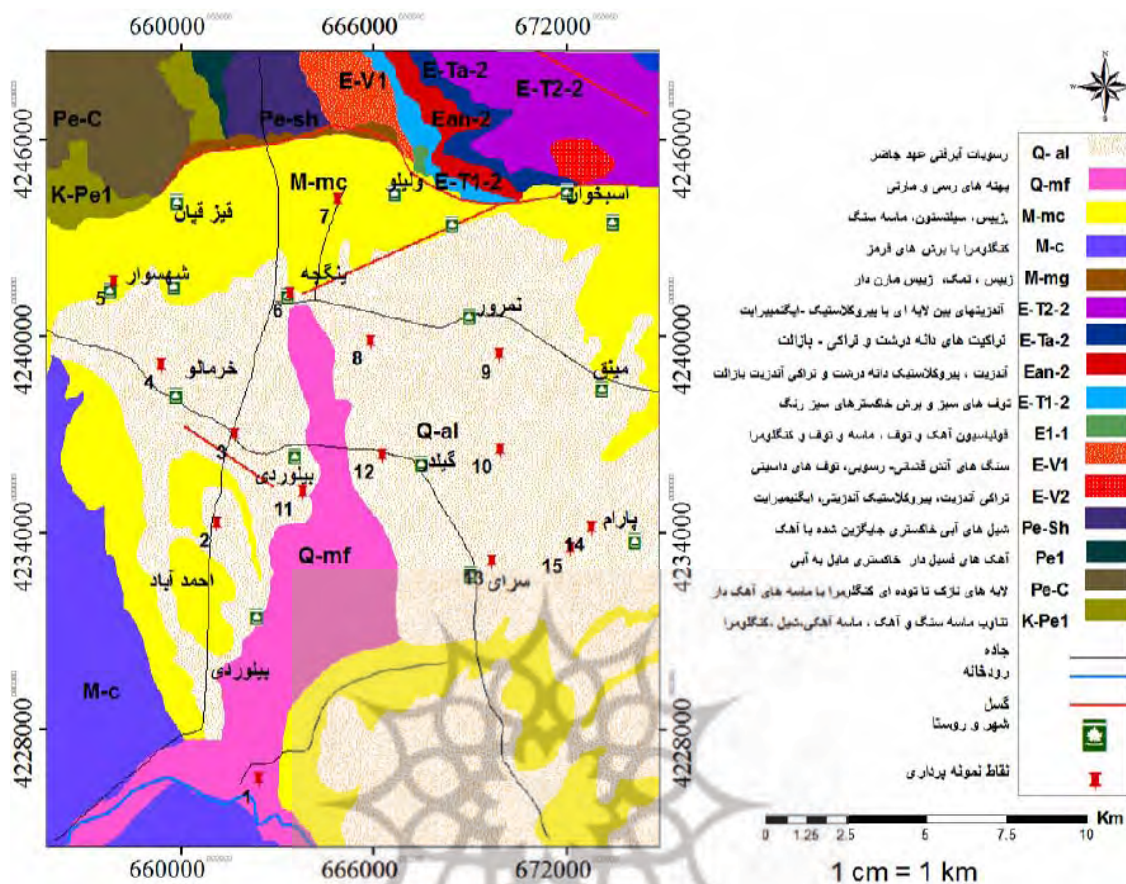
کریجینگ همسانگرد و ناهمسانگرد استفاده کرده‌اند و به این نتایج رسیدند که کریجینگ همسانگرد نتایج بهتری می‌دهد. کونگ و همکاران (۲۰۱۴) برای تخمین غلظت آرسنیک چاه‌های تگزاس از مقایسه روشهای معکوس فاصله، کریجینگ گوسی، کریجینگ کروی، کوکریجینگ استفاده کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که معکوس فاصله نتایج بهتری داشته است. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روشهای درون‌یابی، عدم قطعیت تغییرات زمانی و مکانی فسفر کل رودخانه یانگ‌تسه‌خور را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که روش تخمین‌گر موضعی بیشترین و روش کریجینگ ناپیوسته کمترین مقدار عدم قطعیت را داراست.

در این تحقیق با توجه به این که تا به حال ارزیابی دقیقی از توزیع مقادیر بالای نیترا در آبخوان دشت بیلوردی انجام نگرفته است، به مقایسه نتایج روشهای درون‌یابی مختلف و ارزیابی آنها به منظور حصول بهترین مدل با کمترین خطا اقدام کردیم. بدین منظور غلظت یون نیترا به دست آمده از داده‌های اخذ شده در مهر ماه (سال ۱۳۹۲) را با انواع روش‌ها شامل: معکوس فاصله (IDW)^۱، تابع شعاعی (RBF)^۲، تخمین‌گر عام (GP)^۳، تخمین‌گر موضعی (LP)^۴ کریجینگ (K)^۵ و کوکریجینگ (CoK)^۶ درون‌یابی شدند، این روشها با استفاده از معیارهای RMSE^۷ و نمودارهای تطابق رگرسیون با هم مقایسه، و بهترین روش برای درون‌یابی توزیع یون نیترا در دشت بیلوردی معرفی کردیم.

محدوده مطالعاتی

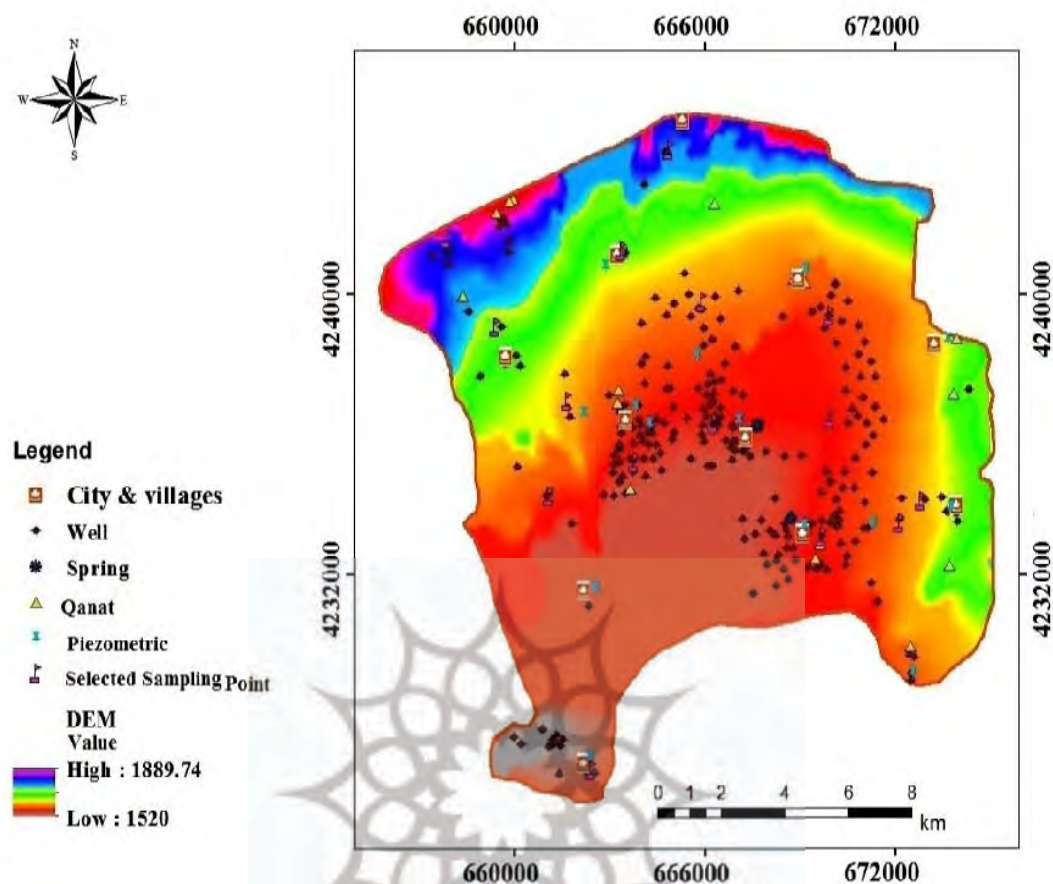
محدوده مطالعاتی دشت بیلوردی با ۲۸۹ کیلومترمربع در ۴۵ کیلومتری شمال شرق تبریز قرار دارد و از نظر هیدرولوژیکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه محسوب می‌شود از نظر چینه‌شناسی شامل بخش بسیار کمی از رسوبهای کرتاسه (ماسه‌سنگ‌های آهکی، شیل، کنگلومرا)، ائوسن (تراکی آندزیت، تراکیت، توف داسیتی تا ریوداسیتی، ایگنمبرایت، سنگ‌های آذرین - رسوبی، لاهای آندزیتی و داسیتی، لایه‌های غیریکنواخت مارن ژیبس دار، مارن)، میوسن (لایه‌های غیریکنواخت مارن - ژیبس، ماسه‌سنگ، سیلت سنگ، مارن ژیبس‌دار، مارن نم‌دار، لایه‌های قرمز برش و گنگلومرا) تا عهد حاضر (رسوبات و تراس‌های آبرفتی، پهنه‌های رسی و مارنی) است. در (شکل ۱)، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه آمده است.

- 1- IDW (Inverse Distance Weighting)
- 2- RBF (Radial Basis Function)
- 3- GP (Global Polynomial)
- 4- LP (Local Polynomial)
- 5- K (Kriging)
- 6- CoK (CoKriging)
- 7- Root Mean Square Error



شکل (۱) نقشه زمین‌شناسی، موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری از دشت بیلوردی

از لحاظ توپوگرافی، مرتفع‌ترین نقطه حوضه آبریز دارای رقم ارتفاعی حدود ۲۸۰۰ متر در روستای شهسوار و پست‌ترین نقطه حوضه هم در شیخ رجب و دارای رقم ارتفاعی در حدود ۱۳۲۰ متر، و متوسط ارتفاع دشت ۲۰۵۰ متر از سطح دریا است. در این دشت تنها منبع آب مصرفی، سفره‌های زیرزمینی هستند که بهره‌برداری از آنها با استحصال آب از ۱۱۸ حلقه چاه عمیق فعال با تخلیه ۶/۷۷ میلیون مترمکعب در سال، ۱۸ حلقه چاه نیمه‌عمیق فعال با تخلیه سالانه ۰/۲۰۳ میلیون مترمکعب، ۱۷ رشته قنات با آب‌دهی سالانه ۱/۳۳۷ میلیون مترمکعب به همراه ۷ دهنه چشمه با آب‌دهی سالانه ۰/۲۲۳، انجام می‌شود (شکل ۲).



شکل (۲) نقشه پراکندگی منابع آب زیرزمینی، دشت بیلوردی

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها

جهت بررسی میزان غلظت یون نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت بیلوردی، در مهر ماه ۱۳۹۲ که سطح آبهای زیرزمینی کاهش و به تبع آن غلظت یون نیترات افزایش می‌یابد، بر اساس استانداردهای موجود ۱۵ نمونه از نقاط مختلف، برداشتیم و غلظت یون نیترات نمونه‌ها را به روش اسپکترو فوتومتری (براساس روش‌های استاندارد (American Public Health Association 1998) اندازه‌گیری کردیم. نتایج آنالیز نشان می‌دهند که نیترات در تعدادی از نمونه‌ها بالاتر از حد استاندارد WHO (۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) است به طوری که نمونه‌های برداشت شده از مرکز دشت و پایین‌دست دشت همگی دارای آلودگی نیترات هستند و در پایین دست دشت حتی به ۱۷۸ ppm نیز رسیده است. جدول ۱، نتایج آنالیز آزمایشگاهی یون نیترات را نشان می‌دهد.

جدول (۱) غلظت نیترات نمونه‌های آب دشت بیلوردی بر حسب میلی‌گرم در لیتر

شماره نمونه	مقدار نیترات	شماره نمونه	مقدار نیترات
W1	۱۷۸	W9	۸/۶۶
W2	۵۳/۷۷	W10	۱۳
W3	۱۹/۱۶	W11	۲۳/۶۰
W4	۱۲/۱۴	W12	۱/۷۴
W5	۱/۲۱	W13	۹
W6	۴/۵	W14	۸/۷۳
W7	۱۲/۸۲	W15	۹/۳۱
W8	۶/۴۴		

روشهای درون‌یابی مورد استفاده

درون‌یابی فرایند تخمین نقاط مجهول توسط نقاط معلوم است. در این روشها با استفاده از نقاط نمونه که گسسته‌اند، یک سطح رستری (پیوسته) ساخته می‌شود که بعد سوم آن مقادیر نمونه‌برداری شده است و در صورت نیاز می‌توان به خطوط هم‌مقدار تبدیل گردد. عمده عملیات درون‌یابی توسط نرم‌افزار Arc Map.GS⁺ و Surfer انجام می‌گیرد. در این تحقیق از نرم‌افزار Arc Map استفاده کرده‌ایم. روشهای موجود برای درون‌یابی در محیط ArcMap به دو صورت معین (Deterministic) و زمین آماری (Geostatistical) است. در روش‌های معین جهت پیش‌بینی، بر حسب نوع درون‌یابی از توابع ریاضی استفاده می‌شود ولی در روش‌های زمین آماری علاوه بر توابع ریاضی از آمار نیز برای پیش‌بینی نقاط نامعلوم استفاده می‌شود. از بین روش‌های درون‌یابی مذکور، روش‌های LP, GP, RBF, IDW جزء روش‌های معین هستند و روشهای CoK و K جزء روش‌های زمین آماری هستند.

روش عکس فاصله (IDW)

در این روش برای هر یک از نقاط، وزنی بر اساس فاصله بین نقطه‌ی اندازه‌گیری شده تا موقعیت نقطه مجهول در نظر می‌گیرند و وزندهی‌ها توسط توان وزندهی کنترل می‌شوند. لذا در این روش صحت‌سنجی با تغییر توان انجام می‌گیرد؛ به صورتی که توان‌های بزرگ‌تر، تأثیر نقاط دورتر را از نقطه برآوردی کاهش می‌دهند و توانهای کوچک‌تر، وزنها را به طور یکنواخت‌تری بین نقاط هم جوار توزیع می‌کند (ایساکس و سری واتساو. ۱۹۸۹). رابطه ۱، معادله تخمین در روش معکوس فاصله را نشان می‌دهد.

$$Z(x_i) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{d_i^a} z(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{d_i^a} z} \quad (\text{معادله ۱})$$

که در آن d_i : فاصله بین نقطه تخمین تا هر یک از نمونه‌های واقع در همسایگی آن، $Z(x_i)$: مقدار تخمین خاصیت مورد نظر در نقطه x_i مقدار مشاهده شده خاصیت مورد نظر در نقطه x_i و α عبارت از توان عکس فاصله هستند.

روش تابع شعاعی (RBF)

این روش یک تابع عمومی را به کار می‌گیرد که وابسته به فاصله بین نقاط درون‌یابی شده و نمونه‌برداری شده است (آگیلر و همکاران، ۲۰۰۵). تعریف ریاضی این روش در معادله ۲ آمده است.

$$z(x) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x) + \sum_{j=1}^n b_j \psi(d_j) \quad \text{معادله (۲)}$$

در این معادله $\psi(d)$ تابع پایه شعاعی، d_j فاصله بین نقاط نمونه‌برداری شده و پیش‌بینی شده نقطه x را نشان می‌دهد. $F(x)$ روند تابع و عضو اساسی برای چند جمله‌ای‌های با درجه کمتر از m است. روش تابع شعاعی خود، برحسب نوع تابع، دارای ۵ نوع اسپیلاین کاملاً منظم (CRS)^۱، اسپیلاین کششی (IMQ)^۲، اسپیلاین چند ربعی (MQ)^۳، اسپیلاین چند ربعی معکوس (IMQ)^۴ اسپیلاین صفحه‌ای نازک (TPS)^۵ است که هر یک از آنها معادله‌ای دارد که به ترتیب در روابط ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ آمده است (یون فنگ و همکاران، ۲۰۱۱).

$$\text{CRS: } \psi(d) = \ln\left(\frac{cd}{2}\right)^2 + E_1(cd)^2 + \gamma \quad \text{معادله (۳)}$$

$$\text{IMQ: } \psi(d) = (\sqrt{d^2 + c^2})^{-1} \quad \text{معادله (۴)}$$

$$\text{MQ: } \psi(d) = \sqrt{d^2 + c^2} \quad \text{معادله (۵)}$$

$$\text{ST: } \psi(d) = \ln\left(\frac{cd}{2}\right) + I_0(cd) + \gamma \quad \text{معادله (۶)}$$

$$\text{TPS: } \psi(d) = c^2 d^2 \ln(cd) \quad \text{معادله (۷)}$$

در این معادلات d ، فاصله بین نقاط نمونه‌برداری و پیش‌بینی شده، c ، فاکتور ملایم کردن انحنای سطح زمین، I_0 ، تابع بسل اصلاح شده، و γ ، ثابت اویلر است. استفاده از هر یک از این جواب‌های متفاوتی به دست می‌دهند.

1- Completely Regularized Spline
2- Spline With Tension
3- Multi Quadratic
4- Inverse Multi Quadratic
5- Thin Plate Spline

روش تخمین‌گر عام (GP)

پیشنهاد می‌شود که هنگامی که تغییرات از منطقه‌ای به منطقه دیگر آرام باشد، مانند بررسی آلودگی در یک منطقه صنعتی و یا بررسی‌هایی در یک منطقه وسیع و جهانی که بررسی‌ها سطحی و وسیع‌اند، از روش تخمین‌گر عام استفاده گردد (یان، ۲۰۰۹).

روش تخمین‌گر موضعی (LP)

تخمین‌گر موضعی فرایندی است که یک فرمول (غالباً چندجمله‌ای) برای درون‌یابی پیدا می‌کند. روشی سریع با دقتی کمتر و ایجادکننده سطحی صاف است. این روش نسبت به روش کریجینگ خودکارتر عمل می‌کند و انعطاف‌پذیری کمتری در ایجاد نقشه‌ها دارد. پیشنهاد می‌شود از این روش در مناطق کوچک که تغییرات و یا نقاط نمونه در آن کم است، استفاده شود (فن گابیلز، ۱۹۹۶).

درون‌یابی با روش کریجینگ (K)

روش‌های درون‌یابی کریجینگ (K) جزء روش‌های زمین‌آمار است. تخمین در این دو روش بر اساس ساختار مکانی موجود در محیط صورت می‌گیرد. برای انجام روش‌های زمین‌آمار، داده‌های مورد استفاده باید دو ویژگی داشته باشند: یکی توزیع نرمال فضایی داده‌ها این است که و دیگری میانگین و واریانس در مکان تغییر زیادی نداشته باشد. بیان ریاضی روش زمین‌آمار به صورت زیر است (معادله ۸).

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (\text{معادله ۸})$$

در این رابطه $Z(s)$: مقدار متغیر ناحیه‌ای، $\mu(s)$: روند قطعی و مولفه ساختاری، $\varepsilon(s)$: خطای نمونه نسبت $\mu(s)$ یا مولفه تصادفی است. کریجینگ بهترین تخمین‌گر خطی ناریب است که واریانس تخمین در آن در حداقل است در این روش با توجه به نحوه توزیع مکانی متغیر مورد نظر به تخمین مقادیر مجهول در موقعیت‌های مکانی مطلوب و معلوم پرداخته می‌شود (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸). از انواع روش‌های کریجینگ می‌توان به کریجینگ ساده (SK)^۱، کریجینگ عادی (OK)^۲ و کریجینگ عمومی (UK)^۳ اشاره کرد.

کوکریجینگ (CoK)

روش کوکریجینگ تفاوت زیادی با کریجینگ ندارد در اصل زمانی که تعداد نمونه‌ها کم و یا هدف، تخمین چند متغیر به صورت همزمان باشد، از این روش استفاده کنند. تعریف ریاضی کوکریجینگ نیز مانند کریجینگ است با این تفاوت که یک اندیس به فرمول اضافه می‌شود و برای هر متغیر یک فرمول تعریف می‌شود. از

1- Simple Kriging
2- Ordinary Kriging
3- Universal Kriging

روش‌های کوکریجینگ می‌توان به کوکریجینگ ساده (S CoK)^۱، کوکریجینگ معمولی (O CoK)^۲، و کوکریجینگ عام (U CoK)^۳، می‌توان اشاره کرد.

معیارهای ارزیابی و صحت‌سنجی روشها

معیارهای اعتبارسنجی مختلفی وجود دارد که از آنها برای ارزیابی روش‌های درون‌یابی استفاده می‌شود.

RMSE: یکی از بهترین معیارهای ارزیابی، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) است که هرچه مقدار آن کمتر باشد، بهتر است. معادله محاسبه RMSE به صورت زیر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(xi) - Z(xi))^2}{n}} \quad \text{معادله (۹)}$$

که در آن $Z^*(xi)$: مقدار برآورد شده متغیر i ام (در این پژوهش، غلظت نیترا برآورد شده) $Z(xi)$: مقدار اندازه‌گیری شده متغیر i ام (غلظت نیترا اندازه‌گیری شده) و n ، تعداد نقاط مشاهده‌ای (تعداد نقاط نمونه‌برداری شده) می‌باشد. لازم به ذکر است در روشهایی که پیش‌بینی غلظت نیترا در تعدادی از نمونه‌ها منفی شده، پارامتر RMSE، تحت عنوان غیرقابل قبول معرفی شده است.

نمودار رگرسیون: یکی دیگر از معیارهای ارزیابی، نمودار رگرسیون است. در این نمودار به ازای هر درون‌یابی دو خط راست با رابطه ۱ به ۱، ایجاد می‌شود که یکی از آنها از مقادیر مشاهداتی و دیگری از مقادیر محاسباتی عبور می‌کند. هر چه مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی با هم انطباق بیشتری داشته باشند، دو خط مذکور نیز با هم انطباق بیشتری دارند و درون‌یابی کیفیت بهتری دارد.

نتایج و بحث

در این پژوهش روشهای مختلف درون‌یابی به ترتیب بر اساس مقدار RMSE و تطابق نمودار رگرسیون مقایسه شده و سپس برای شش روش با مقادیر RMSE کمتر و تطابق رگرسیون بیشتر، نقشه‌های پهنه‌بندی توزیع یون نیترا تهیه شده است.

مقایسه روشها بر اساس RMSE

جهت مقایسه روشها بر اساس RMSE انواع روش‌های درون‌یابی شامل وزن‌دهی عکس فاصله، تابع شعاعی، تخمین‌گر عام، تخمین‌گر موضعی، کریجینگ و کوگریجینگ، برای پیش‌بینی توزیع نیترا انتخاب شده است.

1- Ordinary CoKriging
2- Simple Cokriging
3- Universal CoKriging

سپس متناسب با هر روش، معادله‌ها و توان‌ها و رده‌های موجود را تغییر داده‌ایم تا کمترین مقدار RMSE حاصل شود. جدول ۲ مقادیر برای روش‌های معین را نشان می‌دهد.

جدول (۲) نتایج ارزیابی روش‌های معین مختلف، در تخمین مقادیر نترات دشت بیلوردی

روش درونیابی	درون‌یابی مدل	RMSE
معکوس فاصله	توان ۱	۲۰/۲۷
	توان ۲	۱۹/۱۶
	توان ۳	۱۸/۲۶
	توان ۴	۱۷/۵۷
	توان ۵	۱۷/۰۹
	توان ۶	۱۶/۷۸
	توان ۸/۴۳	۱۶/۵۳
تابع پایه شعاعی	اسپیلاین کاملاً منظم	۵/۱
	اسپیلاین کششی	۱۲/۳۸
	اسپیلاین چند ربعی	۶/۳۱
	اسپیلاین چند ربعی معکوس	غ ق ق
تخمین‌گر موضعی	اسپیلاین صفحه‌ای نازک	غ ق ق
	نمایی درجه ۲	۱۱/۲۸
	نمایی درجه ۳	۴/۵۱
	نمایی درجه ۴	۱۰/۶۳
	گوسین درجه ۱	۱۵/۲۲
	گوسین درجه ۲	۱۱/۴۶
	گوسین درجه ۳	۷/۸۵
	گوسین درجه ۴	غ ق ق
	اکسپاننشیال درجه ۲	غ ق ق
	اکسپاننشیال درجه ۳	غ ق ق
	اکسپاننشیال درجه ۴	غ ق ق
	چندجمله‌ای ۲	۱۵/۳۶
	چندجمله‌ای ۳	غ ق ق
چندجمله‌ای ۴	۹/۹۵	
تخمین‌گر عام	درجه ۱	۲۸/۱۶
	درجه ۲	۱۴/۶۷
	درجه ۳	غ ق ق
	درجه ۴	۱۰/۸۸
	درجه ۵	۲۷

در روشهای زمین آمار، داده‌های مورد استفاده باید دو ویژگی داشته باشند: یکی توزیع نرمال فضایی داده‌ها است و دیگری این که میانگین و واریانس در مکان تغییر زیادی نداشته باشد و چون مقادیر مشاهداتی نیترا ت توزیع نرمال نداشتند، قبل از اعمال روشهای کریجینگ و کوکریجینگ داده‌ها را نرمال‌سازی کردیم. آزمون همسانگردی را نیز برای داده‌ها، با رسم واریوگرام‌های مختلف در جهت‌های گوناگون انجام دادیم. یکسان بودن واریوگرام‌ها در جهات مختلف، نشانگر همسانگرد بودن توزیع داده در منطقه مطالعاتی بود. همچنین برای صحت‌سنجی واریوگرام‌های زمین آماری، از اثر قطعه‌ای نسبی (اثر قطعه‌ای^۱ تقسیم بر مقدار سیل^۲) ارائه شده توسط ایساک و سریواستاو (۱۹۸۹) استفاده کردیم، به طوری که این معیار برای تمام مدل‌های زمین آمار کمتر از ۲ درصد بود این نشان‌دهنده صحت مدل‌های زمین آماری در منطقه مورد مطالعه است. لذا با تهیه واریوگرام همسانگرد مدل‌های مختلف کریجینگ (ساده، معمولی، عام) را تهیه و نتایج آن در جدول ۳ ارائه کردیم. در تهیه مدل‌های کوکریجینگ علاوه بر واریوگرام را همسانگرد نیترا ت به عنوان پارامتر اولیه، کراس واریوگرام نیز به دلیل استفاده از پارامتر ثانویه سطح آب زیرزمینی، که بیشترین همبستگی را با نیترا ت داشت رسم کردیم. نتایج مقادیر RMSE روش‌های زمین آماری کوکریجینگ مختلف در جدول ۳ آمده است.

جدول (۳) نتایج ارزیابی روش‌های مختلف زمین آماری، در تخمین مقادیر نیترا ت دشت بیلوردی

روش درون‌یابی	درون‌یابی مدل	RMSE
کریجینگ معمولی	چندجمله‌ای	۷/۸۵
	نمایی	۶/۵۰
	گوسین	۱۰/۰۹
	اکسپاننشیال	۱۰/۴۹
	درجه چهارم	۹/۸۱
کریجینگ ساده	ثابت	۱۲/۳۰
	چندجمله‌ای	۸/۷۴
	نمایی	۷/۲۵
	گوسین	۹/۹۱
	اکسپاننشیال	۹/۹۴
کریجینگ عام	درجه چهارم	۷/۹۶
	ثابت	۱۲/۲۵
	چندجمله‌ای	۲۱/۵۳
	نمایی	۲۱/۲۳
	گوسین	۲۱/۴۳
	اکسپاننشیال	۶/۷۸
	درجه چهارم	۷/۲۱

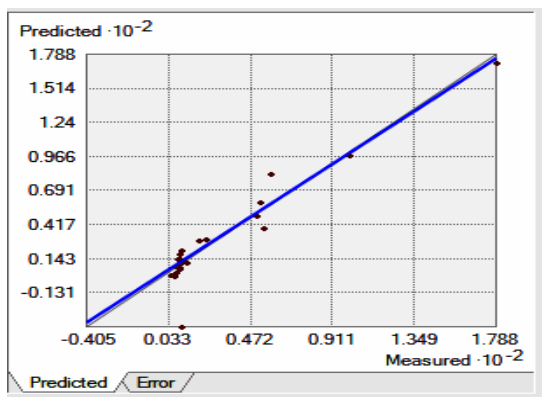
1- Nugget Effect

2- Sill

۲۱/۳۲	ثابت	
۲۳/۲۸	چندجمله‌ای	
۲۰/۲۱	نمایی	کو کریجینگ معمولی
۲۳/۴۰	گوسی	
۲۳/۸۰	اکسپاننشیال	
۲۳/۴۰	چندجمله‌ای	
۲۲/۴۰	نمایی	کو کریجینگ ساده
۲۳/۴۰	گوسی	
۲۴/۵۰	اکسپاننشیال	
۷/۰۶	چندجمله‌ای	
۲۰/۵۱	نمایی	کو کریجینگ عام
۲۱/۴۳	گوسی	
۲۰/۵۱	اکسپاننشیال	

جداول ۲ و ۳ نشان می‌دهند، از بین تمام روشها به ترتیب شش روش: تخمین‌گر موضعی با تابع نمایی درجه ۳ (۴/۵۱)، تابع شعاعی با اسپیلاین کاملاً منظم (۵/۱)، تابع شعاعی با اسپیلاین چند ربعی (۶/۳۱)، کریجینگ معمولی با تابع نمایی (۶/۵)، کریجینگ عام با تابع اکسپاننشیال (۶/۷۸) و کوکریجینگ عام با تابع چندجمله‌ای (۷/۰۶) دارای کمترین مقادیر RMSE هستند و از میان تمام روشها تخمین‌گر موضعی کمترین RMSE را دارد. روشهای معین نسبت به روشهای زمین‌آماری مخصوصاً کوکریجینگ بهتر جواب می‌دهند و از بین روشهای زمین‌آماری، کریجینگ از کوکریجینگ بهتر جواب می‌دهد. روش معکوس فاصله نسبت به سایر روشها بالاتر و پراکندگی کمتری دارد. روشهای کوکریجینگ معمولی، ساده و عام، همگی دارای RMSE بالا هستند جز روش کوکریجینگ عام با تابع اکسپاننشیال که مقدار آن کم است. بالاترین RMSE مربوط به روش تخمین‌گر عام با تابع درجه ۱ است که مقدار آن برابر با ۲۸/۱۶ است.

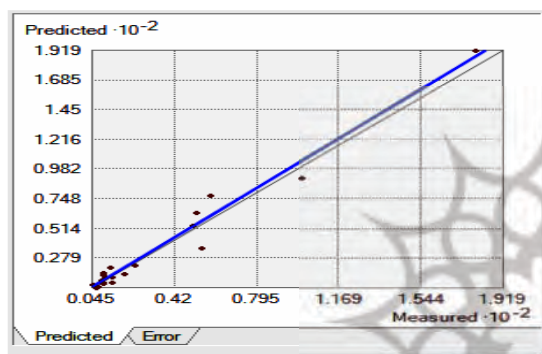
مقایسه بر اساس نمودار تطابق رگرسیون: بعد از مشخص شدن ۶ روش با کمترین RMSE، جهت صحت سنجی این شش روش، از نمودار رگرسیون مقادیر مشاهداتی و محاسباتی استفاده کردیم. هرچه اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی یون نترات کمتر باشد، نمودار رگرسیون تطابق بیشتری دارد. شکل ۴. نمودار تطابق بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده نترات در روشهای، LP، RBF-MQ، RBF-CRS، OK، UK و UCoK را نشان می‌دهد.



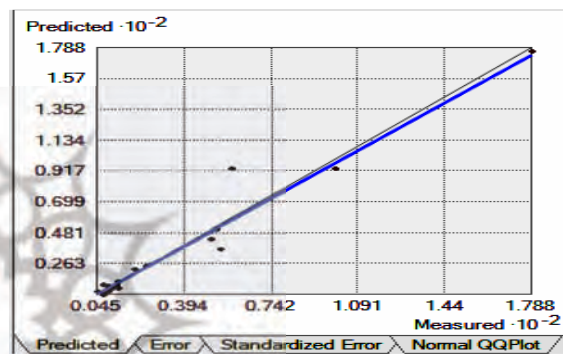
تابع شعاعی با اسپیلاین کاملاً منظم (RBF-CRS)



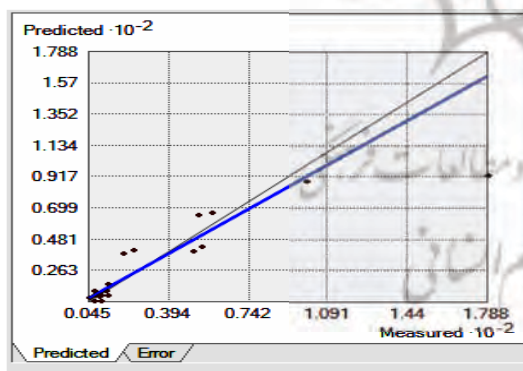
تخمینگر موضعی با تابع نمایی درجه ۳ (LP)



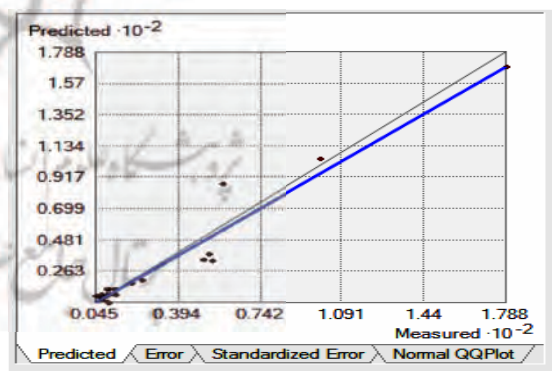
کریجینگ معمولی با تابع نمایی (OK)



تابع شعاعی با اسپیلاین چند ربعی (RBF-MQ)



کوکر جینگ عام با تابع چند جمله‌ای (U CoK)



کریجینگ عام با تابع اکیپنشیال (U K)

شکل (۴) نمودار تطابق بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نبرت در روش‌های، LP LP, RBF-CRS, RBF-MQ, OK, UK و

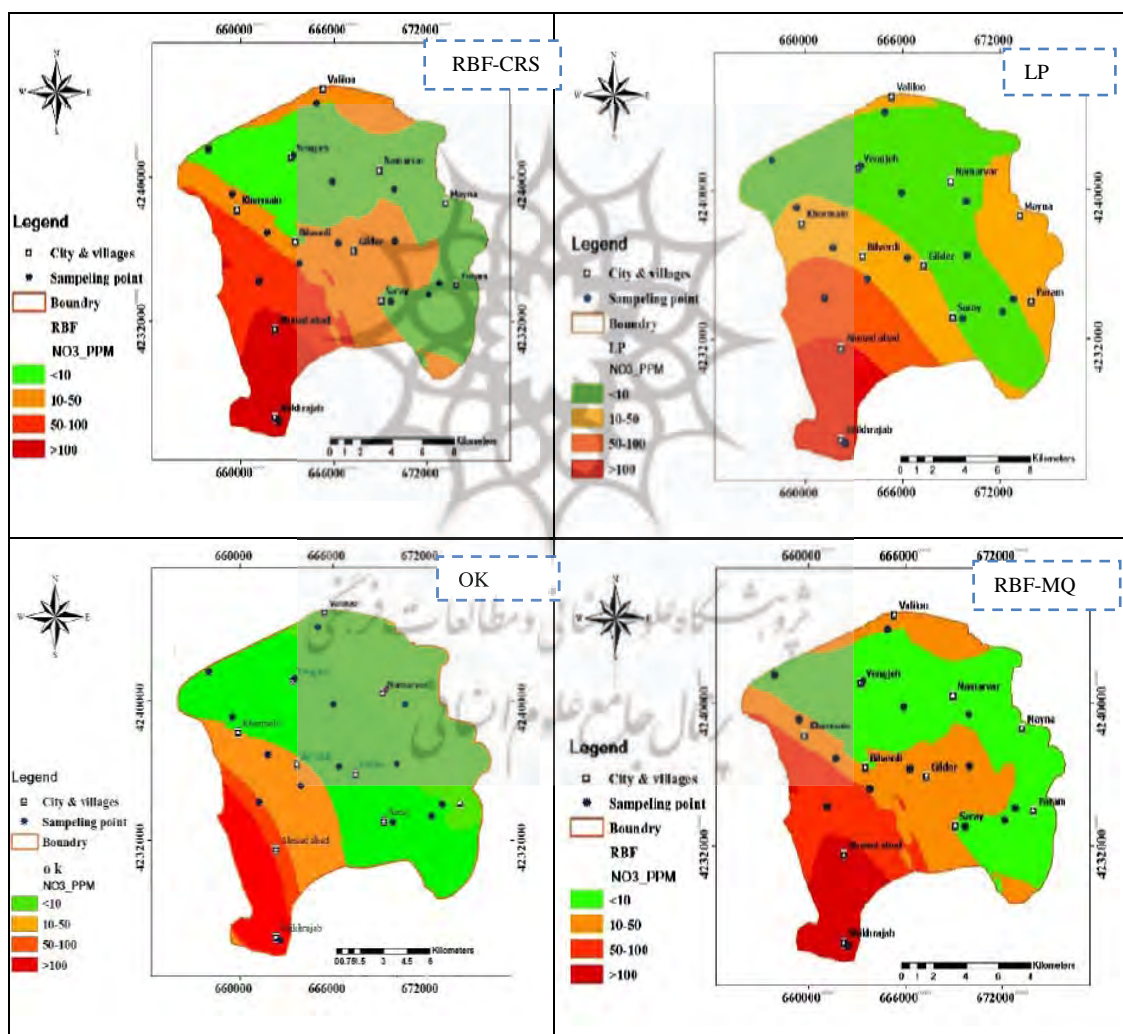
UCoK

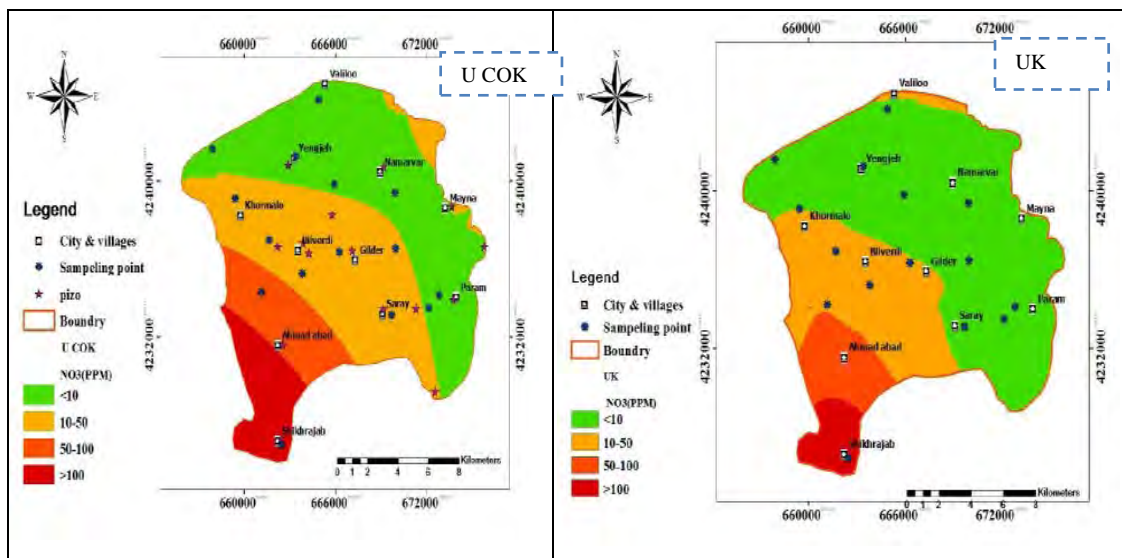
شکل ۴ نشان می‌دهد که نمودارهای رگرسیون با نتایج حاصل از ارزیابی RMSE مطابقت دارد به طوری که در روش مورد نظر، به همان ترتیبی که مقدار RMSE کمتر می‌شود، میزان تطابق نمودارهای

رگرسیون بیشتر می‌شود. بنابراین در این تحقیق، روش تخمینگر موضعی با تابع نمایی درجه ۳، بهترین روش را برای درون‌یابی توزیع یون نیترات نشان می‌دهد چون کمترین RMSE و بیشترین تطابق رگرسیون را دارد.

پهنه‌بندی توزیع یون نیترات بر اساس روشهای درون‌یابی با کمترین خطا

پس از مقایسه روشها و مشخص شدن روشهای دقیق‌تر، به منظور بررسی توزیع آلودگی نیترات نقشه‌های پهنه‌بندی توزیع یون نیترات بر اساس روشهای، LP، RBF-CRS، RBF-MQ، OK، U CoK و U K تهیه شدند که در شکل ۵ آمده‌اند.





شکل (۵) پهنه‌بندی یون نیترات بر اساس کمترین مقدار RMSE و بیشترین تطابق در روشهای، LP، RBF-MQ، RBF-CRS،

UK، OK و UCoK

بر اساس این نقشه‌ها، در منابع آب بخشهایی از شمال، شمال شرق و شمال غرب دشت آلودگی وجود ندارد ولی در مرکز، جنوب و غرب دشت آلودگی وجود دارد. یکی از دلایل احتمالی وجود آنومالی در این بخشها، این است که جهت جریان روانابها از اطراف به سمت مرکز دشت است بنابراین روانابها، نیترات حاصل از کودهای حیوانی و شیمیایی اطراف دشت را همراه با خود به مرکز دشت و نهایتاً خروجی دشت می‌برند. بنابر این نیترات به آبهای زیرزمینی نفوذ کرده، باعث آلوده شدن آنها می‌شود و همچنین در پایین‌دست دشت سطح آب بالا است و همین امر باعث شده است که آبهای زیرزمینی بیشتر تحت تأثیر روانابهای حاوی نیترات قرار بگیرند. نقشه‌ها نشان می‌دهند که کمترین ناحیه آلوده مربوط به روش کریجینگ معمولی و بیشترین ناحیه آلوده مربوط به روش تابع شعاعی با اسپیلاین کاملاً منظم است.

نتیجه‌گیری

از نتایج این پژوهش و مقالات متعدد مورد استفاده، چنین برمی‌آید که انتخاب بهترین روش درون‌یابی وابسته به ویژگیهای محل پروژه و مقادیر مشاهداتی است. روشهای درون‌یابی با توجه به ویژگیهای مکان پژوهش، پراکنش و تعداد نقاط نمونه، نوع متغیر و... از محلی به محل دیگر و حتی در یک مکان ولی برای متغیر دیگری می‌تواند متفاوت باشد. در این تحقیق، روش تخمینگر موضعی با تابع چندجمله‌ای درجه ۳، بهترین روش برای درون‌یابی توزیع یون نیترات است چون کمترین RMSE و بیشترین تطابق رگرسیون را دارد. از بین انواع روشهای درون‌یابی انجام شده، روشهای معین نسبت به روشهای آماری بهتر جواب می‌دهند، از بین روشها و زیر روشهای معین به ترتیب، تخمین‌گر موضعی، تابع شعاعی و تخمین‌گر عام و معکوس فاصله و از

بین روش‌های زمین‌آماری هم انواع روش‌های کریجینگ (ساده، معمولی و عام) نسبت به انواع روش‌های کوکریجینگ (معمولی، ساده و عام) RMSE کمتری دارند. نقشه‌های پهنبندی شده نشان می‌دهند که در بالادست دشت آلودگی غلظت نیترات کمتر از 10 ppm ولی از مرکز دشت به سمت پایین‌دست دشت آلودگی نیترات وجود دارد به طوری که در خروجی دشت غلظت نیترات به 178 ppm رسیده است. دلایل احتمالی تراکم غلظت نیترات در این بخش‌ها، رواناب‌های حاوی کودهای کشاورزی و شیمیایی و همچنین بالا بودن سطح آب زیرزمینی است نقشه‌ها نشان می‌دهند که کمترین ناحیه آلوده مربوط به روش کریجینگ عام و بیشترین ناحیه آلوده مربوط به روش تابع شعاعی با اسپیلاین کاملاً منظم است. بر اساس جداول مذکور که دامنه تغییرات RMSE در روش‌های منتخب زیاد نیست (از $1/4$ تا $6/7$)، می‌توان استفاده از مدل‌های چندگانه یا مرکب را برای مطالعات آتی ارائه پیشنهاد کرد.



منابع

- اصغری مقدم الف، نورانی و، ندیری ع. (۱۳۸۸)، پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده متروی شهر تبریز با استفاده از مدل کریجینگ عصبی. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱۳، شماره ۱: صفحه ۱۴-۲۴.
- حسنی پاک، ع. (۱۳۷۷)، زمین‌آمار (ژئواستاتیسیتیک). چاپ اول. انتشارات دانشگاه تهران.
- Aguiler, F.j., Aguirra, F., Aguilar, M.A., Carvajal, F., 2005, **Effect of terrain morphology, sampling density and interpolation methods on grid DEM accuracy**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 71, PP.805-815.
- Ahmadi, S.H., Sedghamiz, A., 2007, **Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations**, Environ Monit Assess, Vol.129, PP. 277-294.
- Almasri, M.N., Jagath J Kaluarachch., 2004, **Assessment and management of long-term nitrate pollution of ground water in agriculture-dominated watersheds**, Journal of Hydrology, Vol. 295, No. 1-4, PP. 225-245.
- American Public Health Association, 1998, **Standard method for the examination of water and wastewater**. 17 th edition. Washington, DC.
- Barca, E., Passarella, G. 2007, **Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation. A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation**, Environmental Geology, Vol. 137, PP.73-261.
- Fan, J., Gibels, I., 1996, **Local Polynomial Modelling and Its Applications**, Chapman & Hall. London. Water Resources Bulletin., Vol. 87, PP.998-1004.
- Gaus, I. Kinniburgh, D.G, Talbot, J.C., Webster, R. 2003, **Geostatistical analysis of arsenic concentration in groundwater in Bangladesh using disjunctive kriging**, Environmental Geology, Vol. 44, PP.939-948.
- Gong, G., Mattevada, S., O'Bryant, S.E., 2014, **Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas**, Environmental Research, Vol. 130, PP. 59-69.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989, **An Introduction to Applied Geostatistic**, Oxford University Press New York, P.561
- Jianyao,C., Makoto,T.,Guanqun, L., 2007, **Nitrate pollution of groundwater Yellow River delta China**, Hydrogeology Jornal, Vol.15, PP. 1604-1615.
- Kalvif S, Khan IU, Siddiqui., 2005, **Nitrate/Nitrite Contamination in Groundwater of Karachi and its Correlation with Other Physicochemical Parameters**. Sci. Environ Manage, Vol. 13(2), PP. 121-125.

- Lee SM, Min KD., Woo NC., 2003, **Statistical models for the assessment of nitrate contamination in urban groundwater using GIS**, Environmental Geology, Vol.44(1), PP. 210–221.
- Liu, R., Chen,Y., Sun, Ch., Zhang, P., Wang, J., Zh, Wenwen Yu., 2014, **Uncertainty analysis of total phosphorus spatial–temporal variations in the Yangtze River Estuary using different interpolation methods**, Marine Pollution Bulletin, Vol. 86, No.1–2, PP. 68-75.
- Mohan, Pokhrel, R., Kuwano, J., Tachibana, Sh., 2013, **A kriging method of interpolation used to map liquefaction potential over alluvial ground**, Engineering Geology, Vol. 152, No. 1, 18, PP. 26-37.
- WHO., 2006, **Guidelines of drinking water quality**. First addendum to the 3rd pp.
- Xin. Y., 2009, **Linear regression analysis: theory and computing**, Published by world Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore, 59224.
- Xie, Y., bin Chen, T., Mei Lei, Jun Yang, Qing-jun Guo, Bo Song, Xiao-yong Zhou, 2011, **Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis**, Chemosphere, Vol. 82, No. 3, PP. 468-476.

