

کاربرد و مقایسه روش‌های معین و زمین‌آماری برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب

امید اسدی نلیوان^۱، احمد فتاحی^۲، نرگس سقازاده^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۲ استادیار مجتمع آموزش عالی اردکان

^{۳*} دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری مجتمع آموزش عالی اردکان

پست الکترونیک نویسنده مسئول:

n.saghazadeh@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۱۵

چکیده:

مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی نقش مهمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک بازی می‌کند. بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی در شناخت وضعیت کیفی آبخوان، منابع آلوده‌کننده و تعیین مناسب‌ترین راهکارهای مدیریتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های زمین‌آماری و GIS می‌توانند در این راستا ابزار مفیدی باشند. در این مقاله، توزیع آلانده‌های pH و EC, TDS, TH در سطح آب‌های زیرزمینی دشت کبودرآهنگ در استان همدان، با استفاده از روش معین عکس فاصله و روش‌های زمین‌آماری توابع شعاعی، تخمین‌گر موضعی، تخمین‌گر عام و روش کریجینگ معمولی در نرم‌افزار Arc GIS مورد ارزیابی قرار گرفت و نقشه‌های پراکنش مکانی هر کدام تهیه شد. بر این اساس، نمونه‌های آب زیرزمینی ۲۷ چاه بررسی شد. پس از بررسی واریوگرام و مشخص شدن مکانی بودن تغییرات پارامترهای مورد بررسی، اقدام به میان‌یابی پارامترها به روش‌های مختلف مذکور شد و با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، بهترین مدل ارزیابی با کمترین مقدار RMSE انتخاب شد. نتایج نشان داد که پارامترهای EC, TDS و TH با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی کمترین مقدار RMSE و پارامتر pH با استفاده از روش تخمین‌گر عام، کمترین مقدار RMSE را داشته و برای تهیه نقشه توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش‌ها استفاده شد. با توجه به استاندارد آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی و نقشه‌های به‌دست آمده از زمین‌آمار، نتایج نشان داد که دو پارامتر TH و pH در کل دشت برای شرب، بدون محدودیت هستند و پارامتر EC نیز فقط در جنوب شرقی دشت که مساحت بسیار کمی را در برمی‌گیرد، دارای محدودیت و در بقیه دشت بدون محدودیت است. مقدار TDS از مرکز دشت به سمت شمال شرقی که خالی از سکنه است، روندی کاهشی دارد و بدون محدودیت است؛ اما در بقیه مناطق به لحاظ شرب، محدودکننده است. دلیل روند کاهش کیفیت آب زیرزمینی برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و حفر چاه‌های غیرمجاز است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات مکانی، زمین‌آمار، کبودرآهنگ، میانگین مربع خطا.

مقدمه

امروزه آب زیرزمینی در بیشتر مناطق جهان از اهمیت بسیار زیادی برای تأمین آب شیرین برخوردار است. آب‌های زیرزمینی بیشترین نقش را در تأمین آب شرب به‌عهده دارند. افزایش جمعیت و در نتیجه آن، افزایش بهره‌برداری از این منابع ارزشمند باعث شده است که نه تنها کمیت منابع آب زیرزمینی کاهش یابد، بلکه کیفیت این منابع نیز رو به نامناسب بودن پیش رود؛ بنابراین، با توجه به محدود بودن منابع آب زیرزمینی، استفاده بهینه از این منابع، مورد توجه محققان قرار گرفته است (آذره و همکاران، ۲۰۱۲). مهم‌ترین مشکلی که امروزه آب‌های زیرزمینی را تهدید می‌کند، آلوده شدن آن‌هاست. یکی از مهم‌ترین نکات در کنترل و پیشگیری از آلودگی، شناسایی عوامل و منابع آلودگی، مناطق بحرانی آلوده‌شده و همچنین جهت حرکت آلودگی است تا بتوان به کمک این اطلاعات، گام‌های مؤثری در جهت حفظ و افزایش کیفیت آب زیرزمینی انجام داد (عسکری، ۱۳۸۸).

با اینکه از نظر کمی، فراوان‌ترین ماده کره زمین آب است، آب با کیفیت مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی بسیار محدود بوده و با پیشرفت تکنولوژی و تخلیه بی‌رویه پساب و فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی به منابع و ذخایر آبی موجود، امکان استفاده از منابع مزبور روزبه‌روز محدودتر و در مقابل، تقاضا برای استفاده از آن‌ها بیشتر می‌شود (قبادی، ۱۳۸۹). بدین ترتیب، حفظ و حراست از منابع و ذخایر آبی موجود و اعمال مدیریت صحیح بهره‌برداری از آن‌ها، یکی از اساسی‌ترین وظایف برنامه‌ریزان، سیاست‌گذاران، مسئولان و افراد ذی‌ربط است.

منابع آب زیرزمینی در کشور ایران و سایر کشورهای دیگر که آب و هوایی مشابه دارند، مهم‌ترین منابع آب مورد استفاده در کشاورزی و شرب به‌شمار می‌رود (شعبانی، ۱۳۸۷). از یک سو، افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی باعث استفاده روزافزون از این منابع شده است و از سوی دیگر، پایش و بررسی کیفیت آب زیرزمینی، کاری سخت و هزینه‌بر است و استفاده از روش‌های ارزان و در دسترس مثل زمین‌آمار را می‌طلبد. زمین‌آمار شاخه‌ای از علم آمار کاربردی است که

می‌تواند مجموعه وسیعی از تخمین‌گرهای آماری را به‌منظور برآورد خصوصیت مورد نظر در مکانی که نمونه‌برداری نشده، با استفاده از اطلاعات حاصل از نقاط نمونه‌برداری شده ارائه دهد. با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌توان مقادیر عظیمی از داده‌ها را با سرعت زیاد و هزینه بسیار کم، نگهداری و بازیابی کرد. همچنین استفاده از GIS، امکان تحلیل‌های زمین‌آماري را برای کاربر فراهم می‌کند (احمدی و صدق‌آمیز، ۲۰۰۸).

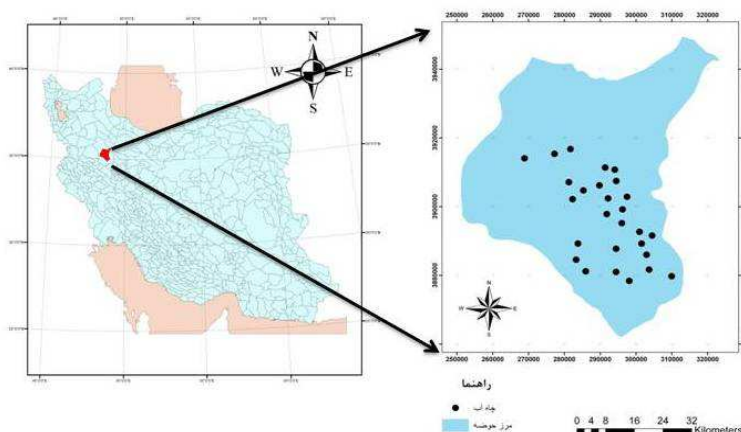
در داخل و خارج از کشور، مطالعات گوناگونی درباره کاربرد روش‌های میان‌یابی، در مطالعه آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است؛ از جمله آن‌ها جاگر (۱۹۹۰) از ابزارهای زمین‌آمار مثل کریجینگ برای مدل‌سازی متغیرهای کیفیت آب استفاده کرد و نتیجه گرفت که کریجینگ، از دیگر ابزارهای ژئواستاتستیک برای مدل‌سازی متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی بهتر است. کرسیک (۱۹۹۷) روش کریجینگ را از میان دیگر روش‌های زمین‌آماري، به‌عنوان بهترین و قوی‌ترین ابزار برای درون‌یابی داده‌ها و تهیه نقشه‌های آب زیرزمینی معرفی کرد. لی و همکاران (۲۰۰۳) نتایج بهتری را از روش معکوس فاصله در مقایسه با روش‌های دیگر در سئول کره جنوبی برای نقشه‌بندی مواد آلی و نترات با توجه به معیار میانگین مجذور خطا به‌عنوان معیار مقایسه به‌دست آورده‌اند. بوسن و زمبیک (۲۰۰۳) تغییرات pH خاک در ایالت سائوپائولو برزیل را به دو روش کریجینگ و معکوس فاصله، بررسی کرده و کریجینگ را به‌عنوان روشی مناسب‌تر ارائه کرده‌اند. هو و همکاران (۲۰۰۵) در شمال دشت چین، از روش کریجینگ معمولی برای بررسی تغییرات مکانی سطح سفره، EC و غلظت‌های نیتروژن نیتراتی و از روش کریجینگ شاخص، برای بررسی میزان خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی به نترات استفاده کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، تعیین خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌تواند برای مدیریت مناسب منابع آب زیرزمینی، ممانعت از شوری خاک و حداقل کردن آلودگی نترات در آب‌های زیرزمینی، مفید و کارا باشد. دیک و جرارد (۲۰۰۷) برای تعیین الگوی بهینه نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی و تهیه نقشه نوسانات سطح آب زیرزمینی، از روش کریجینگ جهانی استفاده کردند.

تا ضمن مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آماری و تعیین بهترین روش تخمین و با استفاده از نرم‌افزار GIS، تغییرات مکانی توزیع آب زیرزمینی را در دشت کبودرآهنگ برای مصرف شرب پهنه‌بندی کند.

مواد و روش‌ها

دشت کبودرآهنگ در فاصله ۶۰ کیلومتری از مرکز استان همدان با موقعیت جغرافیایی به طول $27^{\circ} 48'$ درجه و عرض $33^{\circ} 33'$ درجه جغرافیایی و به ارتفاع ۱۶۸۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است (دفتر مطالعات پایه منابع آب همدان، ۱۳۸۷). دشت کبودرآهنگ به‌علت گستردگی زیاد در محدوده زون زمین‌شناسی بزرگ ایران مرکزی و زون متامورفیکی سنجند-سیرجان واقع شده است. این محدوده دارای آب و هوای نیمه‌خشک تا خشک و سرد است. منشأ عمده ریزش‌های جوی این منطقه مدیترانه‌ای بوده و منبع اصلی رطوبت هوا و بارندگی توسط جبهه‌های غربی تأمین می‌شوند. وسعت دشت در برگرفته آبخوان اصلی ۱۱۸۶/۵ کیلومتر مربع است. متوسط بارش‌های جوی براساس آمار ایستگاه‌های موجود ۳۲۵ میلی‌متر است. میزان تخلیه منابع آب زیرزمینی توسط چاه، چشمه و قنات برابر ۴۹۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است. در طول دوره بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان اصلی دشت متوسط سالانه، افت ۱/۶۲ متر و کاهش حجم مخزن معادل ۷۵/۷ میلیون مترمکعب مواجه است. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

آندراده و استیگتر (۲۰۰۹) به بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات و علفکش‌ها در رودخانه موندگو در مرکز پرتغال با استفاده از روش‌های زمین‌آماری پرداخته‌اند. آن‌ها بر کارایی نقشه احتمال آلودگی نیترات بالاتر از مقدار استانداردهای بین‌المللی توسط روش کریجینگ شاخص تأکید دارند. محمدی (۱۳۷۷) از زمین‌آمار برای بررسی تغییرات مکانی و تهیه نقشه شوری خاک در رامهرمز استفاده کرد و نشان داد که نقشه‌های مبتنی بر روش کریجینگ، از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار بوده است. احمدی و صدق‌آمیز (۲۰۰۸) به بررسی و ارزیابی روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در تعیین نقشه هم‌عمق آب‌های زیرزمینی دشت داراب پرداختند. نتایج نشان داد که عمق آب زیرزمینی در نقاط با آب و هوای مختلف تغییر می‌کند و روش کوکریجینگ نسبت به روش کریجینگ در تعیین نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی دقت بیشتری دارد. شعبانی (۱۳۸۷) در مطالعه‌ای به بررسی مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان پرداخت و نتایج نشان داد روش‌های زمین‌آماری ساده و معمولی نسبت به روش‌های معین برتری داشته‌اند. عسکری و همکاران (۱۳۸۸) به وسیله تحلیل‌های زمین‌آماری در دشت قزوین نشان دادند که روش RBF نسبت به دیگر روش‌های درون‌یابی، نتایج بهتری نشان می‌دهد. رستمی و همکاران (۱۳۹۰) در شهر مشهد نشان دادند که یون سولفات با استفاده از روش تخمین‌گر موضعی، کمترین مقدار RMSE را داشته و برای تهیه نقشه توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش استفاده شد؛ بنابراین، این مطالعه در تلاش است



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و محل چاه‌ها

بررسی تغییرات مکانی داده‌ها

هر متغیر تصادفی را می‌توان به صورت دو مؤلفه قطعی و تصادفی در نظر گرفت. برای تعیین میزان ارتباط مکانی یک متغیر تصادفی در زمین آمار از نیم‌تغییرنما استفاده می‌شود. نیم‌تغییرنما کمیتی برداری است که میزان ارتباط مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و در نظر گرفتن فاصله و جهت آن‌ها نشان می‌دهد. یک نیم‌تغییرنما، با استفاده از مقادیر معلوم مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. فرم محاسباتی یک نیم‌تغییرنما به صورت فرمول (۱) است:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2 \quad (1)$$

که در آن، $y(h)$ مقدار شبیه واریوگرام در فاصله (h, x_i) مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان $(x_i + h, Z(x_i))$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان x_i ، n تعداد اندازه‌گیری‌های انجام شده در محدوده مورد مطالعه است (حسینی پاک، ۱۳۷۷).

در این تحقیق جهت بررسی تغییرات مکانی EC, pH, TH, TDS ۲۷ نقطه از سطح دشت که نماینده منطقه مورد مطالعه بودند، انتخاب شدند. داده‌های مذکور از آب منطقه‌ای استان همدان دریافت شده است. در این تحقیق، سعی بر آن است که روش‌های مختلف درون‌یابی با هم مقایسه شوند و بهترین روش انتخاب گردد تا بر اساس آن، نقشه پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی تهیه شود.

روش‌های مختلف درون‌یابی

روش عکس فاصله (IDW^۱): در این روش مقدار فاکتور وزنی (λ_i) با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-a}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-a}} \quad (2)$$

که در آن، D_i فاصله بین نقطه برآورد شده و مقدار مشاهده شده در نقطه a : تعداد نقاط مشاهده شده است. این روش

دارای توان‌های مختلف است که در این تحقیق، توان ۱ تا ۴ استفاده گردید و توان دارای کمترین خطا استفاده شد. روش تخمین‌گر موضعی (GPI^۲): این روش برازش‌دهنده یک سطح هموار توسط توابع ریاضی بر روی نقاط ورودی می‌باشد. این روش مدلی را بر نقاط نمونه‌برداری برازش می‌کند که می‌تواند یک سطح چندضلعی با توان یک، دو و یا چهار باشد. بهترین کاربرد این روش در سطوح با تغییرات ملایم و تدریجی است. این روش نیز دارای توان‌های مختلف است که در این تحقیق، توان ۱ تا ۳ استفاده گردید و توان دارای کمترین خطا استفاده شد.

روش تخمین‌گر عام (LPI^۳): این روش یک دامنه کوتاه از تغییرات در داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد و با فواصل همسایگی در پنجره مشترک حساس است. بدین گونه که پنجره حرکت کرده و مقادیر سطحی در مرکز هر پنجره در هر نقطه به وسیله برازش یک چندضلعی تخمین زده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش تخمین‌گر موضعی دارد. روش توابع شعاعی (RBF^۴): تابع شعاعی تابعی به صورت $\Phi_j(X) = \Phi(X - X_j)$ است که وابسته به فاصله بین $x = R_d$ و نقطه ثابت $X_j \in R_d$ است. در این تابع، Φ تابعی پیوسته و وابسته به هر زیرمجموعه $\Omega \in R_d$ است. نشان‌دهنده فاصله اقلیدوسی بین هر جفت نقطه در مجموعه Ω است. این روش دارای ۵ تابع کرنل (Completely Regularized Spline, Spline With Tension, Multiquadric, Inverse Multiquadric, Thin Plate Spline) است که در این تحقیق، روش Inverse Multiquadric که دارای کمترین مقدار RMSE بود، انتخاب شد.

روش کریجینگ ۵: کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و بهترین تخمین‌گر خطی نااریب است؛ در صورتی که $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان x_i ، Z_0 مقدار تخمین‌زده شده متغیر در نقطه (x_0) از ترکیب خطی (۳) است:

2. Global Polynomial Interpolation
3. Local Polynomial Interpolation
4. Radial Basis Function
5. Kriging

1. Inverse Distance Weighting

در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود و در پایان به ازای هر نقطه مشاهده‌ای یک نقطه برآورد وجود خواهد داشت.

استفاده از روش‌های زمین‌آماری مستلزم بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌هاست که توسط آنالیز واریوگرام این امر بررسی می‌شود و شرط استفاده از این آنالیز، نرمال‌بودن داده‌هاست. هیچ‌یک از پارامترهای استفاده‌شده در این تحقیق، با توجه به هیستوگرام داده‌ها نرمال نبودند و دارای چولگی بودند که با گرفتن لگاریتم از داده‌ها نرمال شدند. برخی از خصوصیات آماری راجع به جامعه آماری نرمال‌شده در جدول ۱ آورده شده است.

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

که در آن، λ_i وزن داده شده به متغیر X در نقطه i ، n : تعداد نقاطی که متغیر در آن‌ها اندازه‌گیری شده است. این نوع کریجینگ را کریجینگ خطی می‌نامند؛ زیرا ترکیب خطی از n داده است. شرط استفاده از این تخمین‌گر، نرمال‌بودن متغیر است (الیاس آذر، ۱۳۸۱).

برای ارزیابی روش‌های زمین‌آماری و انتخاب بهترین روش از نرم‌افزار ArcGIS که توانایی انجام تکنیک ارزیابی متقابل و معیار آماری ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد که معادله محاسبه آن به صورت (۴) است:

$$RMSE = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i))^2 \right] / n} \quad (4)$$

که در آن، $\hat{Z}(x_i)$: مقدار برآوردشده در نقطه x_i ، $Z(x_i)$: مقدار اندازه‌گیری‌شده در نقطه x_i ، i : شماره نقاط، n : تعداد نقاط مشاهده‌شده معیار را دارد، استفاده شد.

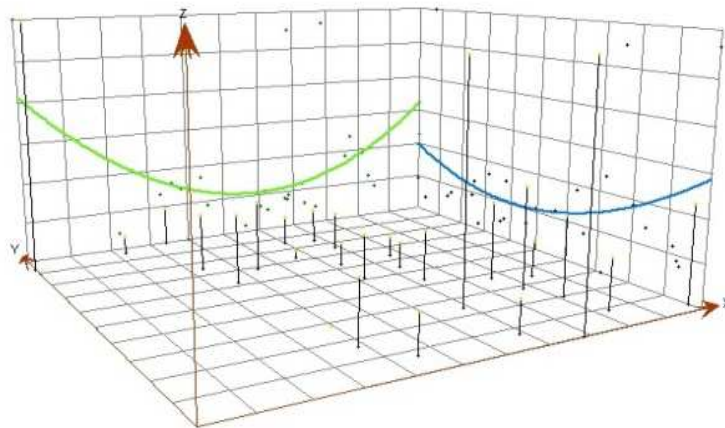
جدول ۱: نتایج آنالیز آماری پارامترهای مورد بررسی (نرمال شده)

متغیر مورد بررسی	تعداد نمونه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	میان
EC(mmhos/cm)	۲۷	۶/۳۲	۸/۳۲	۷/۱۷	۰/۴۹	۰/۸۹	۳/۵۴	۷/۰۹
TDS(mg/l)	۲۷	۵/۸۷	۷/۹۲	۶/۷۵	۰/۵	۰/۸۷	۳/۴۹	۶/۶۵
pH	۲۷	۱/۹۶	۲/۱۲	۲/۰۵	۰/۰۴	۰/۵	۲/۳۲	۲/۰۶
TH(mg/l)	۲۷	۵/۰۷	۶/۷۷	۵/۸۲	۰/۳۶	۰/۲۶	۳/۵۱	۵/۸۱

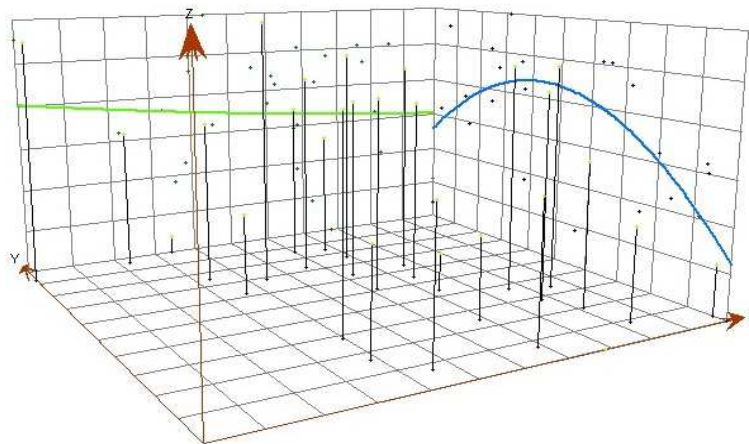
نتایج

نقشه‌های استخراجی مطابقت دارند (شکل ۳). مقادیر سمی واریوگرام ترسیم‌شده (شکل ۴) نشان‌دهنده اختلاف مقادیر TH بین زوج نقاط در فواصل مختلف (دور تا نزدیک) هستند. همچنین این شکل مقادیر سمی واریوگرام نمونه‌های TH را از مرکز به شمال دشت نشان می‌دهد که در مورد سه پارامتر دیگر نیز به همین شکل است. یکی دیگر از استدلال‌های ممکن از این منحنی‌ها اثبات مکانی بودن تغییرات است؛ یعنی با افزایش فاصله نقاط اختلاف داده‌ها افزایش یابد و در شعاع تأثیر مشخصی واریانس داده‌ها ثابت شود. از دیگر تحلیل‌های ممکن از مقادیر سمی واریوگرام، تعیین موقعیت پارامتر و توزیع نقاط زوج با فاصله کم و تغییرات شدید و توزیع نقاط زوج با فاصله زیاد و تغییرات شدید است (شکل‌های ۵ و ۶).

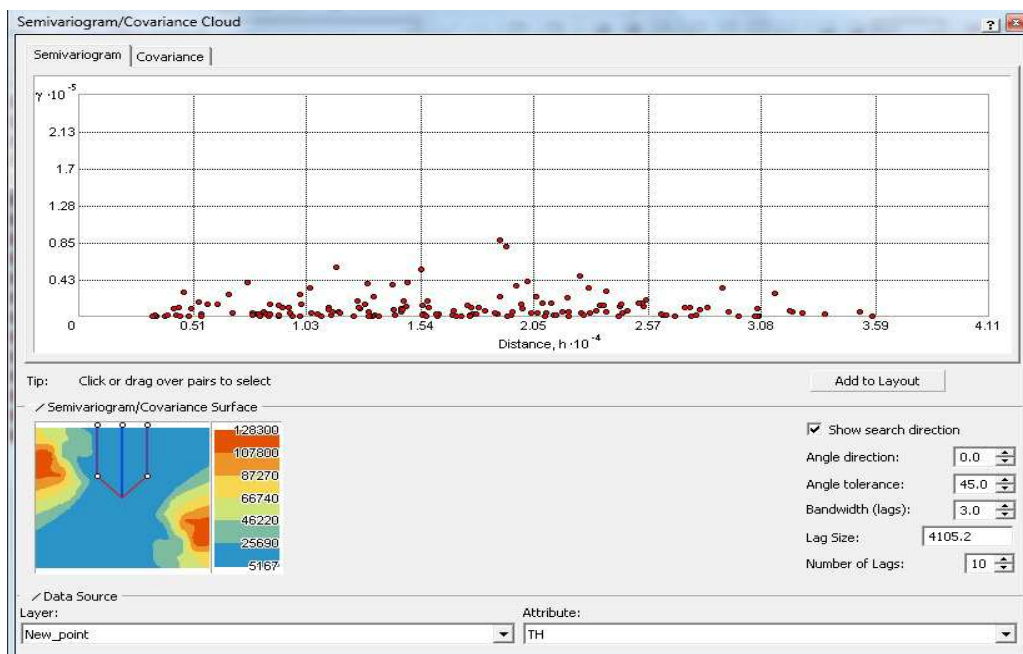
با توجه به اینکه نتایج حاصل از آنالیزها زیاد بود و در بیشتر موارد، آنالیزها یکسان بودند، نتایج پارامتر TH به‌عنوان نمونه آورده شده‌اند. بررسی روند تغییرات مکانی در دشت مورد مطالعه نشان می‌دهد که غلظت EC، TDS و TH از غرب به شرق دشت با شیب بسیار کمی و به‌صورت U شکل افزایش می‌یابد و در مرکز دشت کاهش پیدا می‌کند و در راستای شمالی-جنوبی نیز دارای منحنی تغییرات U شکل است که با نقشه‌های استخراجی مطابقت دارند (شکل ۲). روند تغییرات مکانی pH در دشت نشان می‌دهد که مقدار آن از غرب به شرق دشت به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و در راستای شمالی-جنوبی دارای منحنی تغییرات U شکل است که با



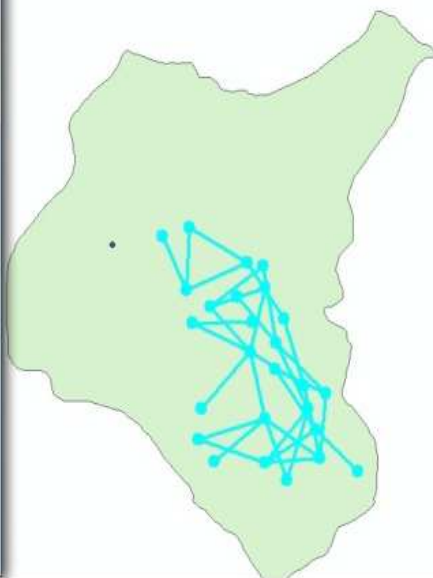
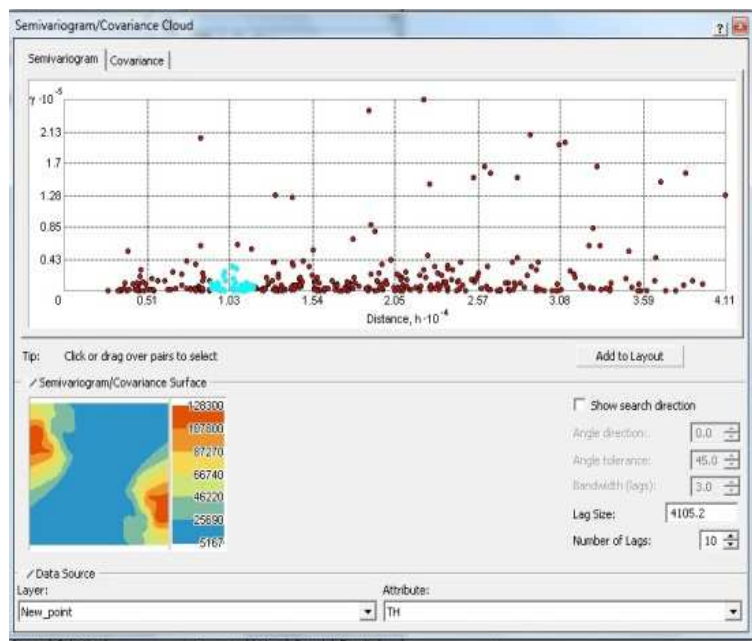
شکل ۲: روند تغییرات مکانی غلظت EC, TDS و TH از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی- جنوبی دارای منحنی تغییرات U شکل



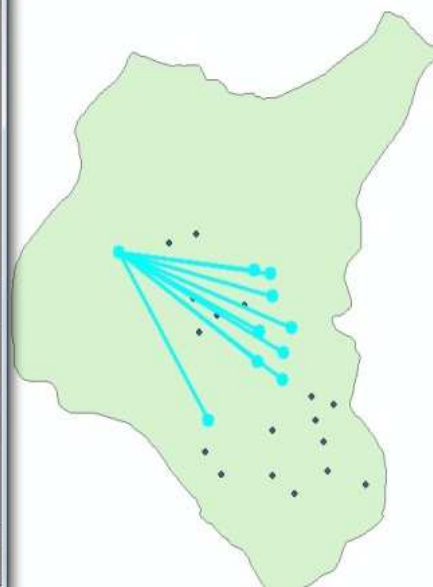
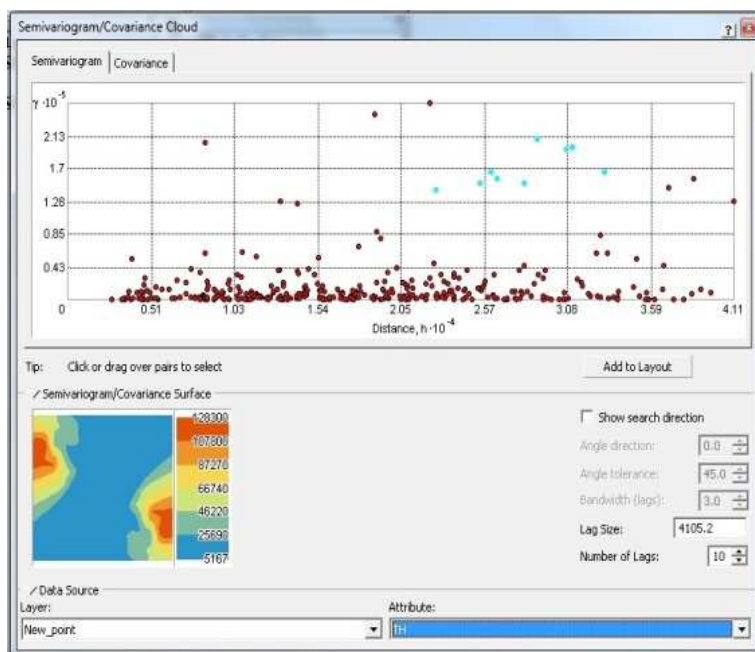
شکل ۳: روند تغییرات مکانی غلظت pH از غرب به شرق دشت (خطی) و در راستای شمالی- جنوبی دارای منحنی تغییرات U شکل



شکل ۴: مقادیر سمی واریوگرام پارامتر TH از مرکز به شمال دشت



شکل ۵: مقادیر سمی واریوگرام پارامتر TH و توزیع نقاط زوج با فاصله کم و تغییرات شدید



شکل ۶: مقادیر سمی واریوگرام پارامتر TH و توزیع نقاط زوج با فاصله زیاد و تغییرات بالا

مناسب‌ترین روش میان‌یابی

برای تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی در بین روش‌های زمین‌آماري از مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. نتایج نشان داد (جدول ۲) پارامترهای EC, TDS و TH با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی و تابع کرنل (Inverse

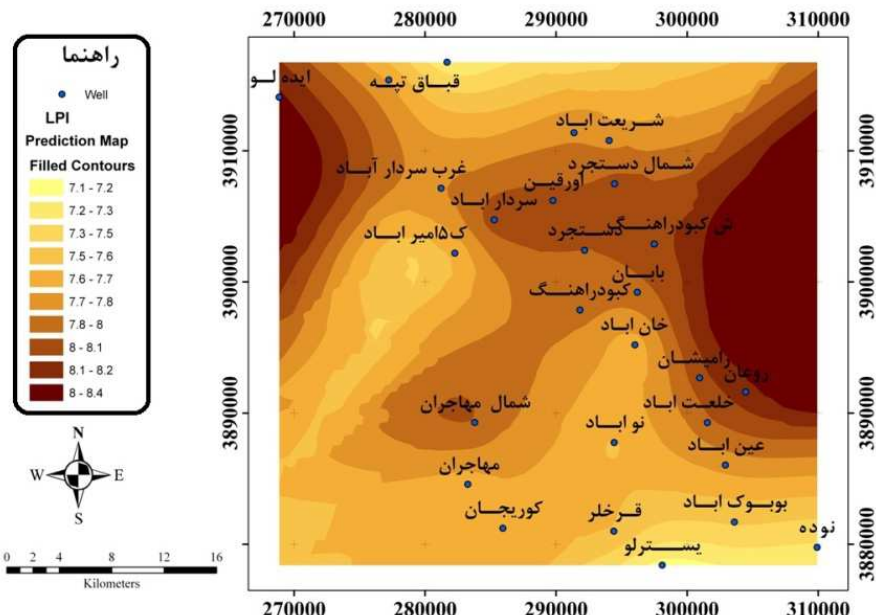
(Multiquadric) کمترین مقدار RMSE را داشته‌اند و پارامتر pH با استفاده از روش تخمین‌گر عام و توان یک کمترین مقدار RMSE را داشته و برای تهیه نقشه توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش‌ها استفاده شد که در ادامه، به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

جدول ۲: مقادیر RMSE پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از روش‌های زمین‌آماري

RMSE				روش‌های مختلف زمین‌آمار
TH	PH	TDS	EC	
۱۴۹/۶	۰/۳۵۱	۶۴۵/۳	۹۶۷/۷	IDW
۱۵۷	۰/۳۳۰	۷۲۱/۲	۱۰۶۶	GPI
۱۵۱/۵	۰/۳۲۹	۷۱۰	۱۰۵۱	LPI
۱۴۶/۸	۰/۳۴۵	۶۴۴/۱	۹۵۲/۴	RBF
۱۶۰/۸	۰/۳۵۷	۷۴۳/۴	۱۱۰۲	Kriging

شمال و جنوب در حال کاهش است. در شرق و شمال غرب دشت به دلیل افزایش کاتیون‌ها در نمونه‌های آب، آب زیرزمینی به سمت قلیایی شدن پیش رفته است که بیشترین مقدار آن ۸/۴ است و در داخل محدوده مطلوب قرار دارد و مشکلی برای شرب ایجاد نمی‌کند.

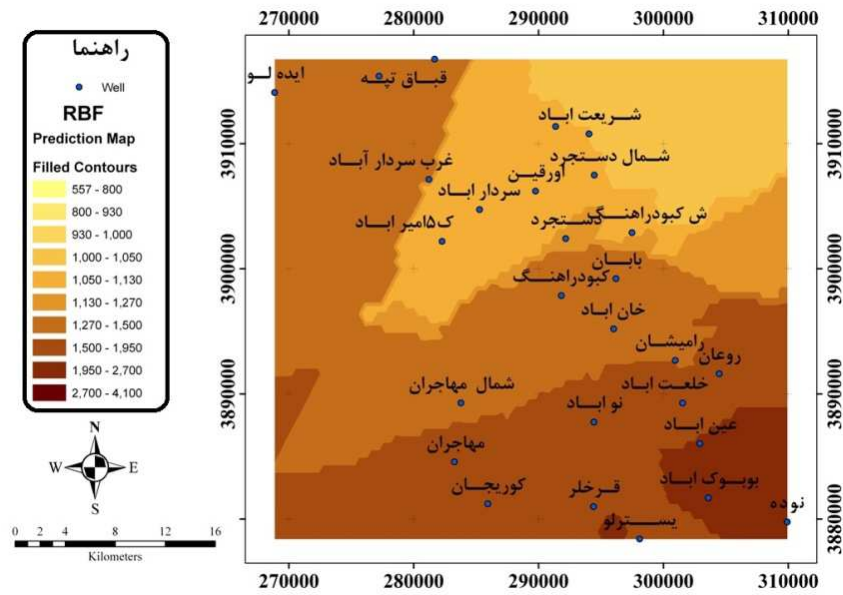
۱. pH: با توجه به استانداردهای آب شرب که حداکثر مطلوب این پارامتر را بین $7 < \text{pH} < 8.5$ تعریف کرده‌اند (مهدوی، ۱۳۸۶) و با توجه به شکل ۲ که پهنه‌بندی آب زیرزمینی را در دشت کبودرآهنگ نشان می‌دهد، هیچ محدودیتی به لحاظ شرب در این دشت وجود ندارد. از مرکز دشت به طرف شرق و غرب pH در حال افزایش و به طرف



شکل ۲: پهنه‌بندی پارامتر pH با استفاده از روش LPI

به خود اختصاص داده‌اند، دارای محدودیت خیلی کم برای شرب هستند و در بقیه مناطق مقدار EC کمتر از ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است که به لحاظ شرب، محدودیتی ندارد.

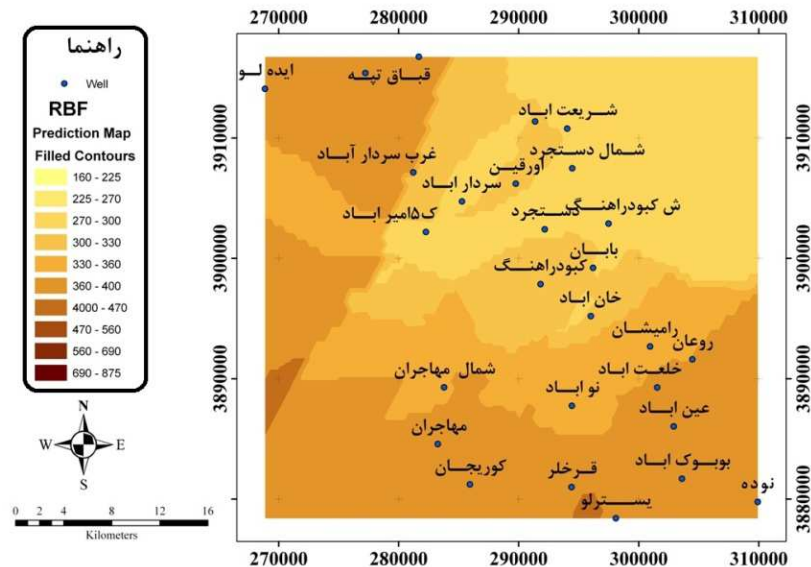
۲. EC: آب‌های مورد استفاده برای شرب انسان در بیشتر موارد، دارای هدایت الکتریکی بین ۵۰ تا ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است (مهدوی، ۱۳۸۶). با توجه به شکل ۳ دیده می‌شود که به جز سه چاه نوده، بوپوک‌آباد و عین‌آباد که در جنوب شرقی دشت واقع شده‌اند و مساحت کمی از دشت را



شکل ۳: پهنه بندی پارامتر EC با استفاده از روش RBF

شده است؛ بنابراین، با توجه به استاندارد سازمان بهداشت جهانی (مهدوی، ۱۳۸۶) مقادیر این پارامتر در دشت کبودرآهنگ به لحاظ شرب محدودیت ایجاد نمی‌کند. به لحاظ سختی، آب کلیه چاه‌ها در طبقه سخت و خیلی سخت طبقه بندی می‌شوند.

۳. TH: به توصیه سازمان بهداشت جهانی (W.H.O) سختی آب شرب نباید از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تجاوز کند و در شرایط خوب، کمتر از ۸۰ باشد (مهدوی، ۱۳۸۶). با توجه به شکل ۴ که پهنه‌بندی پارامتر مورد نظر را نشان می‌دهد، در تمام چاه‌های دشت مقدار TH کمتر از ۳۶۰ میلی‌گرم بر لیتر ثبت



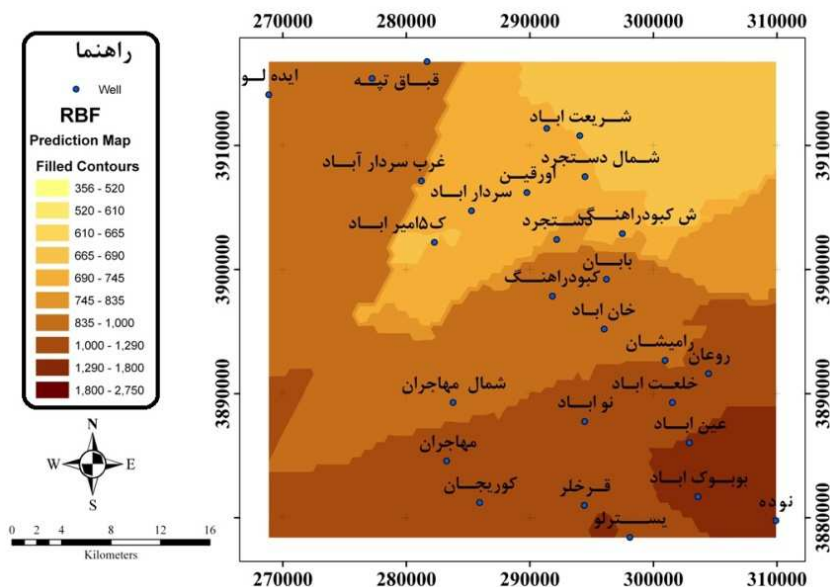
شکل ۴: پهنه بندی پارامتر TH با استفاده از روش RBF

برای آب شرب ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر است (مهدوی، ۱۳۸۶). با توجه به شکل ۵ که پهنه‌بندی پارامتر مورد نظر را نشان می‌دهد، از مرکز دشت به سمت شمال شرقی به دلیل خالی بودن

۴. TDS: با توجه به استانداردهای آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی، استاندارد اروپایی ۱۹۷۰ و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا ۱۹۷۵ مقدار توصیه شده باقی مانده خشک

به‌جز شمال شرقی دشت که مساحت کوچکی از دشت را به خود اختصاص داده است، بقیه منطقه به‌لحاظ TDS دارای محدودیت زیادی برای شرب است.

این مناطق از سکنه، مقادیر باقی‌مانده خشک به‌مرور در حال کاهش است. در جنوب شرقی دشت بیش‌ترین مقدار TDS را داریم که برای مصارف شرب محدودیت بیشتری ایجاد می‌کند.



شکل ۵: پهنه‌بندی پارامتر TDS با استفاده از روش RBF

در منطقه مورد مطالعه است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که آب زیرزمینی دشت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی بوده است. بررسی دقیق روند تغییرات مکانی در دشت نشان می‌دهد که در مناطق کم‌شیب با کاربری کشاورزی، بیش‌ترین مقادیر TDS و EC دیده شده است. مقادیر سمی و آریوگرام ترسیم‌شده نشان‌دهنده مکانی بودن تغییرات بودند. از تحلیل سمی و آریوگرام چنین استنباط می‌شود که نقاط زوج با فاصله کم و تغییرات زیاد در بخش کم‌شیب دشت هستند که می‌تواند با کاهش شیب توجیه شود؛ یعنی آب فرصت بیشتری برای نفوذ خواهد داشت و بر این اساس افزایش مقدار پارامترها را داریم. توزیع نقاط زوج با فاصله زیاد و تغییرات زیاد نشان‌دهنده بالا بودن مقادیر TDS و EC در کاربری کشاورزی و اختلاف درخور توجه مقادیر این پارامترها در آب زیرزمینی این مناطق نسبت به کاربری‌های روستایی است.

در این مقاله، از روش‌های زمین‌آماري عکس فاصله با توان (۴تا۱)، توابع شعاعی (با پنج تابع کرنل)، تخمین‌گر موضعی با توان (۳تا۱)، تخمین‌گر عام با توان (۳تا۱) و روش کریجینگ

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش‌های زمین‌آماري توانایی قابل ملاحظه‌ای در تحلیل مکانی خصوصیات آب زیرزمینی و پهنه‌بندی کیفیت آن دارند. نبود اطلاعات معتبر در کیفیت آب زیرزمینی معمولاً برای پایش کیفی منابع آب زیرزمینی محدودیتی جدی است. توسعه سامانه اطلاعات مکانی (GIS) در برنامه‌های مختلف آب شرب امری ضروری است. نمونه‌برداری آب شرب و پایش آن باید در طراحی برنامه‌ها، اجرا و ارزیابی به‌عنوان عنصر اولیه قرار گیرد. سیستم اطلاعات مکانی براساس الگوی کیفیت آب زیرزمینی با شناخت الگوهای شیمیایی، در تفهیم فرآیندهای ژئوشیمیایی منطقه استفاده و می‌تواند برای مدیریت سلامت عمومی استفاده شود (مخلوم و همکاران، ۱۳۸۳).

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که مقدار TDS و EC در جنوب شرقی دشت کبودراهنگ بیشتر از مقدار استاندارد آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی و نشان‌دهنده آثار فراوان فعالیت‌های انسانی (وجود نیروگاه شهید مفتاح) بر مقدار آن‌ها

مقایسه کرده‌اند که همین روش تحقیق (مقایسه کریجینگ و کوکریجینگ) در انتخاب کریجینگ، به‌عنوان بهترین روش میان‌یابی بی‌تأثیر نبوده است؛ برای مثال، لی و همکاران (۲۰۰۳) و رستمی و همکاران (۱۳۹۰) به‌ترتیب روش‌های معکوس فاصله و تخمین‌گر موضعی را در مقایسه با سایر روش‌های زمین‌آماری برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی توصیه می‌کنند. با توجه به نقشه‌های استخراجی دو پارامتر pH و TH در کل منطقه به‌لحاظ مصرف آب شرب بدون محدودیت هستند. مقدار پارامتر EC نیز فقط در جنوب شرقی دشت دارای محدودیت است که ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه است. مقدار پارامتر TDS به‌جز شمال شرقی در کل دشت، دارای محدودیت زیاد به‌لحاظ مصرف آب شرب است؛ البته یک روند کاهشی کیفیت آب زیرزمینی به‌دلیل وجود سنگ کف کربناته و متعلق به سازند قم که به‌شدت انحلال‌پذیر است، کف‌شکنی چاه‌ها برای برداشت بیشتر آب برای مصارف کشاورزی و شرب و ایجاد نیروگاه شهید مفتاح در جنوب شرقی دشت دیده می‌شود.

معمولی (مدل‌های کروی، گوسی، نمایی) در نرم‌افزار ARC GIS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای EC, TDS و TH با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی و تابع کرنال (Inverse Multiquadric) کمترین مقدار RMSE را داشته‌اند و پارامتر pH با استفاده از روش تخمین‌گر عام با توان یک کمترین مقدار RMSE را داشته و برای تهیه نقشه توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش‌ها استفاده شد.

نتایج این تحقیق به‌جز با نتایج تحقیق عسکری و همکاران (۱۳۸۸) که روش RBF را به‌عنوان بهترین روش معرفی می‌کند با هیچ یک از تحقیقات انجام‌گرفته تا الان که بیشتر روش کریجینگ را به‌عنوان بهترین روش برای پهنه‌بندی معرفی می‌کنند، تطابق ندارد و روش‌های تخمین‌گر توابع شعاعی برای (EC, TDS و TH) و تخمین‌گر عام برای (pH) را با توجه به مجذور میانگین مربعات خطا به‌عنوان بهترین روش‌ها برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی در دشت کیودرآهنگ معرفی می‌کند. البته در بیشتر مطالعات قبلی برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی، فقط روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ را با هم

منابع

۵. شعبانی، محمد. ۱۳۸۷. تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آماری در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی؛ مطالعه موردی، دشت ارسنجان، مجله مهندسی آب، ص ۴۷-۵۸.
۶. عسکری، معصومه، مساعدی، ابوالفضل، دهقانی، امیر احمد و مفتاح هلقی، مهدی. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی به‌وسیله تحلیل‌های زمین‌آماری و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مطالعه موردی - دشت قزوین، کنفرانس بین‌المللی منابع آب با رویکرد منطقه‌ای، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد. ۶ص.
۷. قبادی، محمد حسن، ۱۳۸۹. آب‌های زیرزمینی، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا. ۳۰۳ ص.
۸. محمدی، جواد، ۱۳۷۷. مطالعه تغییرات مکانی شوری خاک در منطقه رامهرمز (خوزستان) با استفاده از نظریه

۱. الیاس آذر، خسرو. ۱۳۸۱. اصلاح خاک‌های شور و سدیمی (مدیریت خاک و آب). انتشارات جهاد دانشگاهی، ۳۰۰ص.
۲. حسنی پاک، علی اصغر. ۱۳۷۷. زمین‌آمار. انتشارات دانشگاه تهران. ۳۳۰ص.
۳. دفتر مطالعات پایه منابع آب همدان، ۱۳۸۷. توجیهی تمدید ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت کیودرآهنگ. ۹۳ص.
۴. رستمی خلیج، محمد، محسنی ساروی، محسن، افشارنیا، رشید و حسامی، دانا. ۱۳۹۰. بررسی توزیع مکانی برخی از خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های معین (مطالعه موردی: حوزه شهری مشهد)، مجموعه مقالات هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، ۸ و ۷ اردیبهشت، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان. ۱۱ص.

- base Wilcox and FAO, Journal Elixir Pollution. 47: 9029 – 9034.
14. Bucene, L.C., Zimback, C.R.L., 2003. Comparison of methods of interpolation and spatial analysis of pH data in Botucatu, SP, IRRIGA. 8(1): 21-28.
 15. Dick, J.B., Gerard. B.M., 2007. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables, Geoderma. 138: 86-95.
 16. Hu, K., Huang, Y., Li, H., Li, B., Chen, D., Edlin White, R., 2005. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain, Environment International. 31: 896 – 903.
 17. Jager. N., 1990. Hydrology and Groundwater simulation, Lewis Publisher.
 18. Kresic, N., 1997. Hydrogeology Groundwater Modeling, Lewis Publishers, Science Journal. 4(1): 9-17.
 19. Lee, S.M., Min, K.D., Woo, N.C., Kim, Yj., Ahn, C.H., 2003. Statistical Models for the Assessment of Nitrate Contamination in urban Groundwater using GIS, Journal Environment Geology 44: 210-221.
- ژئواستاتیک: کریجینگ، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۴(۲): ۴۹-۶۳.
۹. مخدوم، مجید، درویش صفت، علی اصغر، و مخدوم، علی. ۱۳۸۳. ارزیابی و برنامه‌ریزی محیط زیست با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران. ۳۰۸ص.
 ۱۰. مهدوی، محمد، ۱۳۸۶. هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران. ۴۴۱ص.
 11. Ahmadi, S.H., Sedghamiz, A., 2008. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping, Environ Monit Assess. 138: 357–368.
 12. Andrade, A.I.A.S.S., Stigter. T.Y., 2009. Multi-method assessment of nitrate and pesticide contamination in shallow alluvial groundwater as a function of hydrogeological setting and land use, Agricultural Water Management, AGWAT-2849; 15.
 13. Azare, A., Mohseni Saravi, M., Salajegheh, S., Jafari Shalamzari, M., 2012. Temporal and Spatial change of Groundwater quality in Shahr-e-Babak plain for Agricultural the