Evaluation of Interpolation Methods to Determine Spatial Variations of Groundwater Qualitative Parameters (Case study: Gonabad Plain)

Javad Momeni Damaneh
Msc of Desertification, Faculty of Natural Resources, University of Kashan, Iran.

Fatemeh Joulaei
Student Research Committee, Department of Environmental Health Engineering, Gonabad University of Medical Sciences, Gonabad, Iran,

Hosein Alidadi
Proffessor, Health Sciences Research Center,Department of Environmental Health Engineering,School of Health,Mashhad University of Medical Sciences,Mashhad, Iran.

Roya Peirovi
* Lecturer, Department of Environmental Health Engineering, Gonabad University of Medical Sciences, Gonabad, Iran. (Corresponding Author)
peiravi.r@gmu.ac.

Received: 24 May 2015
Accepted: 28 November 2015

ABSTRACT

Background & objective: Groundwater is one of the exploitation important resources in arid and semi-arid areas. Therefore, the spatial and temporal distribution of groundwater quality is very important. The purpose of this study was to evaluate the accuracy of spatial interpolation methods in order to predict the spatial distribution of some groundwater quality parameters such as TH, Ca, pH, Mg and $SO4^{-2}$.

Materials & Methods: in this study data related to 44 exploitation wells in Gonabad plain was used. Then, methods of IDW, SK, OK, UK, RBF, LPI and GPI were investigated. After normalizing the data, QQ plot was drawn. Then, in order to select, an appropriate model for fitting, mutual evaluation methods and estimation errors were used that consisted of MBE, RMSE, MARE and MAPE. Finally, the most appropriate interpolation method was chosen. Zoning maps of the water parameters were prepared by using geostatistical methods in GIS software.

Results: Final zoning model showed, in the center, the west south, and the west of plain concentration of surveyed parameters have been lower than their mean. By moving from the north, the east north, and the east towards the center, the south, and the west south, the parameters concentrations were decreased.

Conclusion: The results showed that kriging method is preferred to other geostatistical methods for zoning of the water quality parameters.

Keywords: Groundwater, Spatial Interpolation, Spatial Distribution, Gonabad Plain

▶ **Citation**: Momeni Damaneh, J. Joulaei, F. Alidadi, H. Peiravi, R. Evaluation of Interpolation Methods to Determine Spatial Variations of Groundwater Qualitative Parameters (Case study: Gonabad Plain). *Iranian Journal of Research in Environmental Health*.Fall 2015;1 (3) : 165-176.

ارزیابی روش‌های درون‌یابی جهت تعیین تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت گناباد)

جواد مومنی دمنه
کارشناس ارشد بیابان زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کاشان، ایران،
فاطمه جولایی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی گناباد، گناباد، ایران،
حسین علیدادی
دانشیار، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، گروه مهندسی بهداشت محیط ، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران،
رویا پیروی
* مربی ، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی گناباد، گناباد، ایران (نویسنده مسئول)
peiravi.r@gmu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۰۷

چکیده

زمینه و هدف: آب زیرزمینی یکی از منابع مهم بهره‌برداری در مناطق خشک و نیمه خشک ایران است. لذا پراکنش مکانی و زمانی کیفیت آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت است. هدف از این پژوهش، ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی مکانی جهت پیش‌بینی پراکنش مکانی بعضی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی نظیر سختی کل، غلظت یون کلسیم، pH، منیزیم و غلظت یون سولفات بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه داده‌های مربوط به ۴۴ نمونه چاه بهره‌برداری دشت گناباد مورد استفاده قرار گرفت. سپس روش‌های تابع فاصلهٔ معکوس وزن‌دار، کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و کریجینگ جهانی، تابع شعاعی، تخمینگر عام و تخمینگر موضعی بررسی شد. پس از نرمال‌سازی داده‌ها، پلات QQ ترسیم گردید. به منظور انتخاب مدل مناسب برای برازش، روش‌های ارزیابی متقابل و خطاهای تخمین شامل MARE، RMSE ، MBE و MAPE مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت بهترین روش درون یابی انتخاب شد. با استفاده از روش‌های زمین آمار در نرم افزار GIS نقشه‌های پهنه بندی پارامترهای آب زیرزمینی تهیه شد.

یافته ها: مدل پهنه بندی نهایی نشان داد، در قسمت میانی و جنوب غربی و غرب دشت گناباد به طور متوسط پارامترهای بررسی شده از میانگین کل آن ها در دشت کمتر بوده است. با حرکت از شمال و شمال شرق و شرق دشت به طرف مرکز، جنوب و جنوب غربی دشت غلظت و تراکم کلیه پارامترها کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: به منظور پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب، روش‌های کریجینگ بر سایر روش‌های زمین‌آمار ارجحیت دارند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، درون‌یابی مکانی، پراکنش مکانی، دشت گناباد.

◀ **استناد:** مومنی دمنه، ج. جولایی، ف. علیدادی، ح. پیروی، ر. ارزیابی روش‌های درون‌یابی جهت تعیین تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت گناباد). *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. پاییز ۱۳۹۴؛۱ (۳): ۱۶۵-۱۷۶.

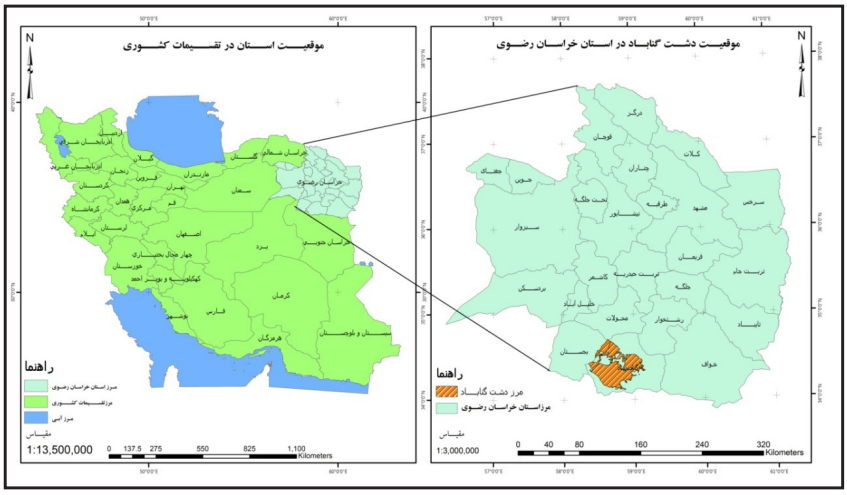
مقدمه

کیفیت آب‌های زیرزمینی مانند آب سطحی دائماً در حال تغییر است، اما این تغییرات نسبت به آب‌های سطحی بسیار کندتر صورت می‌گیرد(۱). سفره‌های آب زیرزمینی در ایران و بسیاری ازکشورهای دارای اقلیم مشابه به عنوان مهمترین منابع تامین کننده آب مورد استفاده در کشاورزی و شرب می‌باشند (۲, ۳). منابع آب زیرزمینی حدود ۰/۶ درصد از کل منابع آب و ۶۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر قابل دسترس را به خود اختصاص می‌دهند(۴,۵). در سال‌های اخیر تامین آب مورد نیاز شرب و صنایع؛ به علت استفاده بی رویه، ورود آلاینده‌های صنعتی و آلودگی آب‌های زیرمینی توسط آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی در کشورهای بسیاری با مشکل مواجه گردیده است(۶). آب‌های زیرزمینی در مقایسه با آب‌های سطحی،کیفیت بالاتر و آلودگی کمتری دارند. در مناطق خشک و نیمه خشک در اغلب موارد از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین آب آشامیدنی استفاده می‌گردد(۷). زندگی در مناطق خشک و کویری جهان تا حدود زیادی به وجود آب‌های زیرزمینی بستگی دارد. بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و آلوده شدن سفره‌های زیرزمینی، از جمله مسائل نگران کننده عصر حاضر می‌باشد(۸). تغییر در کیفیت آب‌های زیرزمینی که معمولاً بر اثر مدیریت نامناسب استحصال آب زیرزمینی رخ می دهد مقدمه ای بر تخریب سایر منابع چه به صورت مستقیم و چه به صورت غیرمستقیم می باشد(۹). روش‌های گوناگونی برای مطالعه و پهنه بندی تغییرات ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آنها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و داده‌های کافی دارای دقت‌های گوناگونی می‌باشد(۷). بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی در شناخت وضعیت کیفی آبخوان، منابع آلوده کننده و تعیین مناسب ترین راهکارهای مدیریتی از اهمیت ویژه ای برخوردار است؛ در همین راستا روش‌های زمین آمار و GIS می‌توانند ابزار مفیدی باشند(۱۰). در پژوهشی که توسط سلیمانی و همکاران به منظور ارزیابی کارایی روش‌های زمین آماری در تهیه نقشه تغییرات TDS و pH چشمه‌های حوزه آبخیز میره در کردستان صورت گرفت مشخص گردید که با استفاده از نقشه‌های درون‌یابی شده چند جمله‌ای عام درجه ۳ وکریجینگ ساده می‌توان به ترتیب نسبت به تخمین مقادیر TDS و pH چشمه‌های موجود در حوضه اقدام کرد(۷). Partha و همکاران روش کریجینگ را به عنوان روش مناسب جهت درون‌یابی داده‌ها در تهیه نقشه‌های پارامترهای کیفیت آب‌های زیرزمینی مانند SAR، EC، نسبت بی کربنات، نسبت کلسیم، نیترات و سختی کل معرفی کرد(۱۱). شعبانی با مقایسه روش‌های گوناگون میان‌یابی برای تهیه نقشه تغییرات TDS و pH آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان به این نتیجه رسید که روش کریجینگ ساده و معمولی نسبت به سایر روش ها، برتری دارد(۲). در مطالعه ای که توسط frinke و همکاران در هلند بر روی پارامترهای کیفی آب‌های زیر زمینی انجام شد نشان داد که روش کریجینگ ساده و معمولی جهت بررسی جنبه‌های مختلف آب‌های زیرزمینی دارای برتری است(۱۲). نتیجه پژوهش Husam و همکاران جهت بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از نقشه برداری زمین آماری در نیوزلند، نشان داد ترکیبی از روش‌های زمین آماری به عنوان روش موثری جهت پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌باشد(۱۳). هوشمند و همکاران برای شبیه‌سازی متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی از ابزارهای زمین آمار مانند کریجینگ و کوکریجینگ استفاده کردند. نتیجه بررسی نشان داد که روش کوکریجینگ از سایر ابزارهای زمین‌آماری برای شبیه‌سازی متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی بهتر است(۱۴). Barcae و Passarella برای تهیهٔ نقشهٔ خطر نیترات در دشت مادنا در ایتالیا از روش کریجینگ گسسته و روشهای شبیه سازی استفاده کردند، نتایج نشان داد که روش کریجینگ گسسته برای مطالعهٔ خطر تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی مناسب است(۱۵). بنابراین با توجه به آنچه مطرح شد، هدف از این پژوهش ارزیابی روش‌های درون‌یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی دشت گناباد و در نتیجه، انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی به

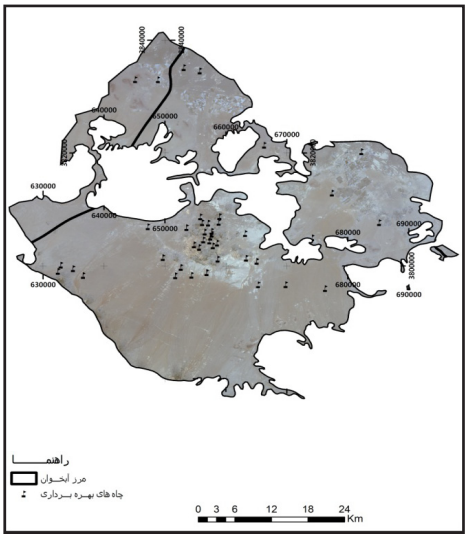
منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در محیط GIS است. با رسیدن به این هدف، می‌توان استفاده از آب و تخصیص آن به انواع کاربری‌ها به ویژه کاربری کشاورزی را مدیریت نمود و بهبود بخشید.

مواد وروش‌ها

منطقه مورد مطالعه: شهرستان گناباد با مساحتی حدود ۵۹۰۲ کیلومترمربع ازنظر موقعیت، در طول جغرافیایی ۶۱۸۹۰۶ تا ۷۲۵۲۴۰ و عرض جغرافیایی ۳۸۵۰۶۴۷ تا ۳۷۶۸۵۸۹ در استان خراسان رضوی قرار دارد .. ارتفاع متوسط این شهرستان از سطح دریای آزاد، ۱۱۰۵ متر است .. به‌طورکلی اقلیم گناباد با عبارت خشک و سرد با تابستان‌های گرم توصیف می‌شود. حداقل دمای هوا در این شهرستان به ۸/۴- درجهٔ سانتی‌گراد و حداکثر دما به ۳۸/۷ درجه سانتی‌گراد است. همچنین میانگین دمای استان برابر ۱۷/۶ درجهٔ سانتی‌گراد است. در شکل (۱) موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه و در شکل (۲)، موقعیت مکانی چاه‌های بهره‌برداری مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و شهرستان



شکل ۲. موقعیت مکانی چاه‌های بهره‌برداری مورد مطالعه

جمع‌آوری داده‌ها: داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی آب چاه‌های در حال بهره‌برداری دشت گناباد مربوط به سال آبی ۳-۱۳۹۲ از سازمان آب منطقه ای خراسان رضوی دریافت شد. انتخاب این سال به این دلیل است که اولا داده‌های موجود در سال‌های اخیر با توجه به افزایش اطلاعات دیده‌بان‌ها و پیشرفت فناوری از دقت و اعتبار بالاتری برخوردار است و ثانیا به دلیل خطای کمتر داده‌ها دراین بازه زمانی، میزان داده‌های بازسازی شده کاهش یافت. البته آمار منابع آلاینده تاثیرگذار جهت تخمین اثر آن ها در دسترس نبود. به منظور بهره‌گیری از آمارهای مذکور، ابتدا داده‌های کیفیت کلیه چاه‌ها به لحاظ صحت و همگنی با استفاده از روش آماری ران تست و نرم‌افزار SPSS موردبررسی قرارگرفت و داده ها به روش لگاریتم گیری نرمال سازی شد. پس از اطمینان از همگنی داده‌ها، ۴۴ حلقه چاه انتخاب گردید.

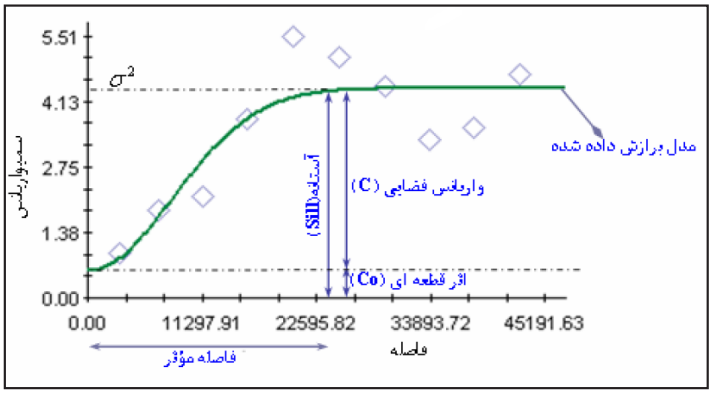
کار با نرم افزار: جهت بررسی میزان تغییرات کیفیت نسبت به میانگین کل چاه‌ها در سطح دشت و همچنین جهت ارزیابی نتایج به دست آمده از شبیه‌های درون‌یابی استفاده گردید. سپس براساس نمودارهای یاد شده، مقایسه روش‌های درون‌یابی و تحلیل‌های مربوط بر روی پهنه‌بندی‌ها انجام گرفت. در این راستا

به منظور تحلیل روش کرجینگ و تعیین شبیه نیم تغییرنمای مناسب و عامل‌های آن، از نرم‌افزار ARCGIS استفاده شد و داده‌های مربوط به ویژگی‌های جغرافیایی و z-value که مقادیر کیفیت سالانه است، به عنوان ورودی به نرم‌افزار تعریف شد. لازم به ذکر است که روش‌های درون‌یابی به دو شیوهٔ قطعی و زمین‌آمار انجام می‌شوند. در روش‌های قطعی برای درون‌یابی، فقط از توابع ریاضی(GPI، LPI، IDW و RBF) استفاده می‌نمایند؛ در حالیکه روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار (OK، SK و UK)، برمبنای تئوری متغیرات ناحیه‌ای پایه‌گذاری شده است و به توابع ریاضی و آمار متکی است؛ و از مدل واریوگرام برای توصیف پیوستگی فضایی داده‌های ورودی و تخمین مقدار مکان‌های اندازه‌گیری نشده، استفاده می‌کنند.

در این نرم‌افزار با اعمال شبیه مورد نظر و انتخاب نیم تغییرنمای مناسب، تحلیل‌های گوناگون انجام گرفت و براساس روش کرجینگ معمولی[1]، ساده[2] و جهانی[3] نقشه‌های پهنه‌بندی داده‌های کیفیت به صورت رستری ترسیم گردید و روش‌های معین یا قطعی LPI[4]، IDW[5] و GPI[6] در نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفت و با بهترین همبستگی در هر روش معین، نقشه‌های رستری آن تهیه گردید. همچنین روش‌های درون‌یابی شعاعی اسپیلان (RBF)[7] با نرم‌افزار تهیه شد و با بهترین همبستگی در هر روش معین، نقشه‌های رستری آن تهیه گردید. تحلیل‌های گوناگونی بر روی نقشه‌های رستری به دست آمده انجام گرفت و نقشه‌ها طبقه‌بندی شدند و برای آنها رستر کد تعریف گردید. به منظور انتخاب مدل مناسب برای برازش از روش‌های ارزیابی متقابل و خطاهای تخمین مانند MARE ، RMSE و MAPE استفاده گردید. در این مطالعه هدف از طبقه‌بندی، مشخص کردن وضعیت کیفیت در مناطق گوناگون نسبت به میانگین بلندمدت است. پس از طبقه‌بندی، تجزیه و تحلیل‌های مکانی در مورد نقشه‌ها انجام گرفت تا ارتباط لازم بین عوارض برقرار شود. سپس با مقایسه شبیه‌های گوناگون درون‌یابی و نمودارهای شاخص‌ها نسبت به میانگین بلندمدت در چاه‌های منتخب، بهترین شبیه درون‌یابی تخمینگر جهت پهنه‌بندی داده‌های کیفیت دشت گناباد مشخص شد.

ویژگی‌های متغیر نمایی: هدف اصلی از محاسبه متغیر نمایی، شناخت تغییرپذیری متغیر نسبت به فاصلهٔ مکانی یا زمانی است. برای این کار لازم است مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به فاصلهٔ معلوم h از یکدیگر قرار دارند محاسبه و در مقابل h رسم گردد(۱۶). هر تغییر نما دارای چند عامل مهم است که در زیر به آن پرداخته‌شده است.

الف- دامنهٔ تأثیر: فاصله‌ای که در آن، متغیر نمای به حد ثابتی می‌رسد و به حالت خط افقی نزدیک می‌شود، دامنه یا شعاع تأثیر (R) نامیده می‌شود (شکل ۳). این دامنه محدوده‌ای را مشخص می‌کند که می‌توان از داده‌های موجود در آن، برای تخمین مقدار متغیر مجهول استفاده کرد. بدیهی است که دامنه تأثیر بزرگ‌تر، دلالت بر پیوستگی مکانی گسترده‌تر دارد (۱۶).



شکل ۳. متغیرنمای و عامل‌های آن

ب- سقف یا آستانهٔ متغیر نمای: به مقدار ثابتی که متغیر نمای در دامنه تأثیر به آن می‌رسد، آستانه گفته می‌شود. مقدار آستانه برابر با واریانس کل تمام نمونه‌هایی است که در محاسبه تغییر نما استفاده شده‌اند (۱۶).

1. Ordinary Kriging
2. Simple Kriging
3. Universal Kriging
4. Local Polynomial Interpolation
5. Inverse Distance Weighting
6. Global Polynomial Interpolation
7. Radial Basis Functions

در روش کریجینگ متغیر نماهایی که به سقف مشخص می‌رسند، اهمیتی بیشتر دارند (شکل ۳). در مواردی، متغیر نماهایی به دست می‌آید که در محدودهٔ فواصل مورد نظر تمایلی به نزدیک شدن به حد ثابتی ندارند. این متغیر نمای‌ها می‌توانند نشان‌دهنده وجود روند در داده‌ها، یا عدم ایستایی داده‌ها باشند.

ج- اثر قطعه‌ای: مقدار متغیر نمای در مبدأ مختصات، یعنی به ازای h=۰ را اثر قطعه‌ای (C) می‌نامند (شکل ۳). در حالت بهینه مقدار C باید صفر باشد، اما در بیشتر مواقع بزرگ‌تر از صفر است. در این حالت جزء تصادفی، یا غیر ساختاردار متغیر ظاهر می‌شود(۱۶).

نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر، شاخصی از قدرت ساختار مکانی در متغیرها است. چنانچه این نسبت کمتر از ۰/۲۵ گردد، نشان‌دهنده همبستگی مکانی قوی است. اگر این نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار گیرد، بیانگر همبستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بزرگ‌تر از ۰/۷۵ گردد، نشان‌دهنده وابستگی مکانی ضعیف است. همبستگی قوی مکانی به این معنی است که در دامنه تأثیر می‌توان متغیر مورد نظر را تخمین زد (۱).

روش‌های ارزیابی خطاهای درون‌یابی: به‌منظور انتخاب روش مناسب درون‌یابی، از روش ارزیابی متقابل استفاده شده است. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف‌شده و با استفاده از سایر نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌گردد .این کار برای تمامی نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به‌گونه‌ای که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت و در پایان با داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده می‌توان خطا و انحراف روش استفاده‌شده را برآورد کرد. به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی داده‌های پیش‌بینی‌شده از سه معیار شاخص میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE)[1]، میانگین خطای اریبی انحراف(MBE)[2]، درصد میانگین خطای مطلق (MAPE)[3] ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)[4] استفاده گردید.

1. Mean Absolute Relative Error
2. Mean Bias Error
3. Mean Absolute Perecent Error
4. Root Mean Squared Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{oi} - X_{ci})^2} \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

$$MARE = \left(\sum \frac{|X_{oi} - X_{ci}|}{X_{oi}}\right)/n \quad \text{(رابطهٔ ۲)}$$

$$MBE = \sum_{i=1}^{n}(Xoi - Xci) \quad \text{(رابطهٔ ۳)}$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}|PE(t)| \quad \text{(رابطهٔ ۴)}$$

$$PE(t) = \frac{Xoi - Xoi}{Xoi} \times 100 \quad \text{(رابطهٔ ۵)}$$

که در این روابط، هر کدام از پارامترها به‌ترتیب عبارتند از: Xoi : مقدار داده مشاهده شده، Xoi: مقدار دادهٔ محاسبه شده توسط مدل، n: تعداد داده‌ها

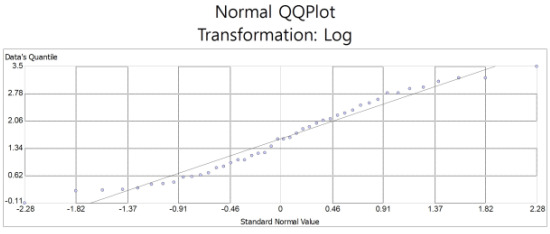
یافته‌ها

نتایج آنالیز آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی برحسب میلی اکی والان بر لیتر به دو صورت لگاریتمی و غیر لگاریتمی در جدول ۱بیان شده است.

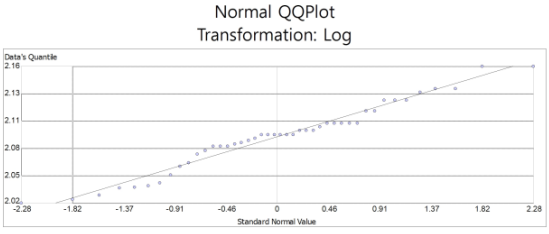
نتایج بررسی تغییرات شاخص‌های شبیه‌سازی شده در دشت گناباد نسبت به میانگین شاخص در چاه‌های مختلف موجود در دشت نشان داد که به طور متوسط میزان پارامترهای بررسی شده ، در سه طرف دشت (شمال، شمال شرقی و شرق دشت) که در سه انتهای دشت قرار دارند، از میزان متوسط کل دشت بیشتر بوده است. شکل۴ نمودار پلات QQ نرمال خصوصیات کیفی آب زیرزمینی را نشان می دهد. پلات QQ نرمال، نشان‌دهنده نرمال بودن یا نبودن داده‌ها است. با توجه به این شکل کلیه خصوصیات کیفی حول یک خط راست برازش یافته‌اند که این مسأله، نشان‌دهنده نرمال بودن همه پارامترهای کیفی آب زیرزمینی است. با توجه به نمودارهای مذکور می‌توان به این فرضیه پرداخت که در قسمت میانی و جنوب غربی و غرب دشت گناباد به طور متوسط شاخص‌های مورد بررسی شده از میانگین کل شاخص در دشت کمتر بوده است.

جدول ۱. نتایج آنالیز آماری کیفیت آب زیرزمینی

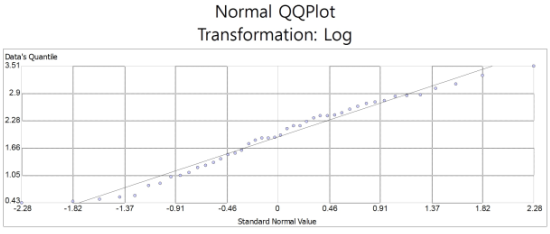
پارامتر کیفی		حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس	چولگی	کشیدگی	میانه
Ca(meq/L)	لگاریتمی	۰/۱۱-	۳/۵۰	۱/۵۹	۱/۰۰	۰/۱۷	۱/۸۳	۱/۵۹
	غیرلگاریتمی	۰/۹	۳۳/۲	۷/۸۴	۷/۸۰	۱/۴۳	۴/۳۸	۴/۸۸
So4(meq/L)	لگاریتمی	-۰/۶۲	۴/۲۳	۲/۶۴	۱/۱۸	-۱/۱۷	۴/۱۳	۲/۹۷
	غیرلگاریتمی	۰/۵۴	۶۹	۲۲/۲۰	۱۸/۱۷	۱/۱۰	۳/۶۵	۱۹/۵۳
pH(meq/L)	لگاریتمی	۲/۰۲	۲/۱۶	۲/۰۹	۰/۰۴	-۰/۰۶	۲/۷۰	۲/۰۹
	غیرلگاریتمی	۷/۵۴	۸/۷	۸/۰۹	۰/۲۸	۰/۰۲	۲/۷۳	۸/۱
Mg(meq/L)	لگاریتمی	۰/۴۳	۳/۵۱	۱/۹۱	۰/۸۴	-۰/۱۵	۲/۰۵	۲/۹۴
	غیرلگاریتمی	۱/۵۴	۳۳/۶	۹/۲۵	۷/۲۸	۱/۳۰	۴/۶۳	۶/۹۳
TH(meq/L)	لگاریتمی	۴/۹۴	۸/۱۱	۶/۴۲	۰/۸۵	-۰/۰۷	۱/۹۱	۶/۵۹
	غیرلگاریتمی	۱۴۰	۳۳۴۰	۸۵۴/۴۳	۶۹۰/۲۱	۱/۳۴	۴/۹۹	۷۲۵/۸۳



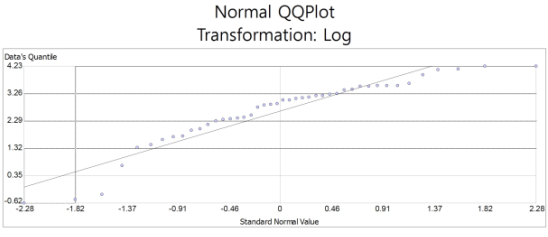
Data Source: POINT Attribute: CA



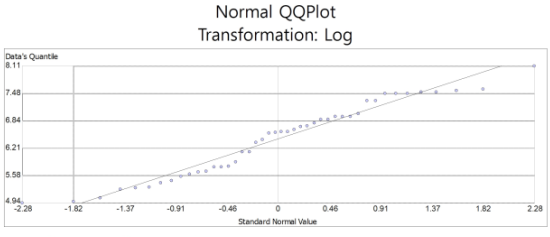
Data Source: POINT Attribute: PH



Data Source: POINT Attribute: MG



Data Source: POINT Attribute: SO4



Data Source: POINT Attribute: TH

شکل ۴. نمودار پلات QQ نرمال خصوصیات کیفی آب زیرزمینی

یافته‌های تعیین بهترین همبستگی و خطاهای تخمین زده شده برای هر یک از شبیه‌های درون‌یابی در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۳ نشان‌دهندهٔ این است که هر چه میزان خطاهای تخمین زده شده کمتر و همبستگی داده‌ها بیشتر باشد، روش درون‌یابی به منظور تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی مناسب‌تر است. شکل‌های۵ تا ۹ نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی دشت گناباد را نشان می دهد.

جدول ۲. نتایج تجزیه و تحلیل آماری مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده کیفیت آب در دشت گناباد

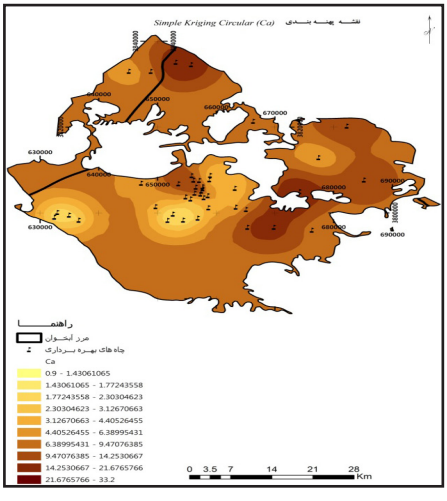
مؤلفه	مدل	اثر قطعه‌ای (Co)	آستانه تأثیر (C+Co)	دامنه تأثیر (۴-h)	$\frac{\text{اثر قطعه‌ای}}{\text{آستانه تأثیر}} = \frac{Co}{C+Co}$
ca(meq/L)	Simple Kriging Circular	۰/۶۷	۰/۹۹	۰/۵۸	۰/۶۷
mg(meq/L)	Simple Kriging K-Bessel	۰/۷۰	۰/۸۲	۲/۰۴	۰/۸۵
pH(meq/L)	Simple Kriging K-Bessel	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۹۴	۱/۰۰
so4(meq/L)	Ordinary Kriging Rational Quadratic	۰/۸۹	۱/۴۸	۱/۳۶	۰/۰۶
TH(meq/L)	Simple Kriging Circular	۰/۱۱	۰/۶۸	۰/۹۲	۰/۱۶

با توجه به جدول ۲، نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر در پارامترهای TH و pH در مرز همبستگی قوی قرار گرفته اند. نزدیکی نسبت‌ها در دو پارامتر مذکور به دلیل ارتباط مستقیم این دو پارامتر است. همچنین پارامترهای Mg، Ca دارای همبستگی مکانی متوسط هستند. همچنین پارامتر So۴ دارای همبستگی مکانی ضعیف می‌باشد.

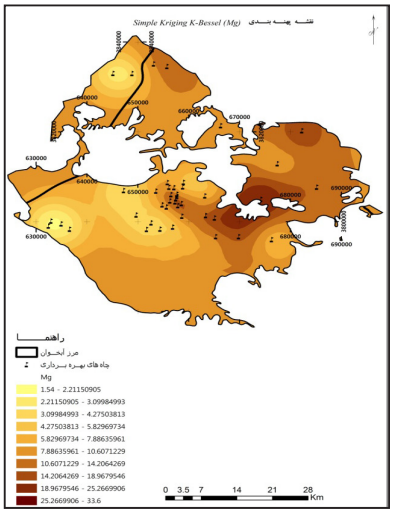
جدول ۳. خطاهای تخمین زده شده برای هریک از شبیه‌های درون یابی

	شاخص کیفیت	Ca				
	روش ارزیابی خطا	MBE	RMSE	MARE	R	MAPE
بهترین روش درون یابی	IDW ۲	۰/۲۷-	۶/۴۹	۰/۵۶	۰/۵۵	۵۶/۰۵
	GPI ۲	۰/۱۵	۷/۲۱	۰/۸۰	۰/۴۱	۸۰/۱۰
	LPI ۱	۰/۰۰	۷/۱۹	۰/۷۷	۰/۴۹	۷۷/۱۴
	RBF Spline with Tension	۰/۵۰-	۶/۲۱	۰/۶۴	۰/۶۰	۶۴/۲۹
	OK Stable	۰/۱۲	۶/۴۵	۰/۴۸	۰/۵۶	۴۷/۶۱
	SK Circular	۰/۲۷-	۶/۷۵	۰/۶۶	۰/۶۰	۶۵/۵۹
	UK Stable	۰/۱۲	۶/۴۵	۰/۴۸	۰/۵۶	۴۷/۶۱
	شاخص کیفیت	Mg				
	روش ارزیابی خطا	MBE	RMSE	MARE	R	MAPE
بهترین روش درون یابی	IDW ۳	۰/۸۵	۶/۵۴	۰/۴۰	۰/۵۱	۳۹/۸۰
	GPI ۱	۰/۰۱	۶/۶۱	۰/۵۴	۰/۴۱	۵۴/۰۲
	LPI ۱	۱/۰۷-	۶/۵۸	۰/۷۷	۰/۴۷	۵۶/۹۷
	RBF Multiquadic	۰/۱۳	۶/۶۳	۰/۴۰	۰/۵۱	۴۰/۲۲
	OK Stable	۰/۴۴	۶/۳۳	۰/۳۸	۰/۵۳	۳۷/۶۸
	SK K-Bessel	۰/۴۱	۵/۷۷	۰/۴۵	۰/۶۱	۴۴/۸۷
	UK Stable	۰/۴۴	۶/۳۳	۰/۳۸	۰/۵۳	۳۷/۶۸

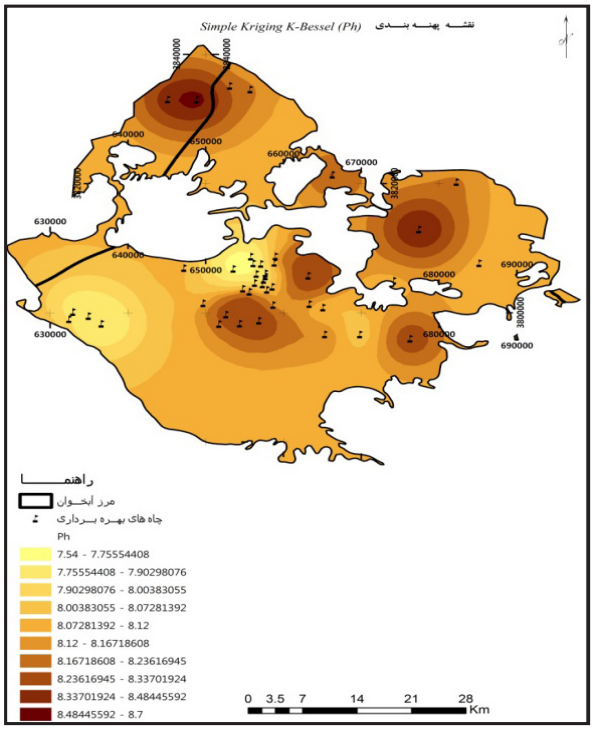
شاخص کیفیت		pH				
بهترین روش درون یابی	روش ارزیابی خطا		MBE	RMSE	MARE	R	MAPE
	IDW	۲	۰/۰۳-	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۶۶	۲/۱۶
	GPI	۱	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۰۳	۰/۳۳	۲/۷۱
	LPI	۱	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۰۲	۰/۵۷	۲/۴۰
	RBF	Spline with Tension	۰/۰۲-	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۶۶	۲/۱۶
	OK	Stable	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۷۰	۱/۹۹
	SK	K-Bessel	۰/۰۴-	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۷۲	۱/۹۸
	UK	Stable	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۷۰	۱/۹۹
شاخص کیفیت		So۴					
بهترین روش درون یابی	روش ارزیابی خطا		MBE	RMSE	MARE	R	MAPE
	IDW	۴	۰/۱۶	۱۲/۷۲	۰/۴۵	۰/۷۳	۴۴/۶۳
	GPI	۳	۱/۵۰	۱۳/۲۷	۰/۹۴	۰/۶۹	۴۹/۳۷
	LPI	۱	۰/۹۲-	۱۳/۲۲	۱/۱۳	۰/۷۱	۱۱۲/۷۷
	RBF	Multiquadic	۰/۰۳	۱۲/۴۱	۰/۳۸	۰/۷۴	۳۸/۴۶
	OK	Rational Quadratic	۲/۴۶	۱۳/۱۲	۰/۳۶	۰/۷۷	۳۶/۱۸
	SK	Stable	۲/۸۰	۱۳/۹۱	۰/۴۷	۰/۶۷	۴۶/۸۸
	UK	Rational Quadratic	۲/۴۶	۱۳/۱۲	۰/۳۶	۰/۷۷	۳۶/۱۸
شاخص کیفیت		TH					
بهترین روش درون یابی	روش ارزیابی خطا		MBE	RMSE	MARE	R	MAPE
	IDW	۲	۳۵/۷۳	۶۱۰/۸۷	۰/۴۴	۰/۴۷	۴۴/۰۸
	GPI	۱	۱/۷۰-	۶۲۸/۹۹	۱/۴۵	۰/۴۱	۱۴۴/۵۵
	LPI	۱	۸۷/۵۸-	۶۶۹/۳۹	۳/۶۳	۰/۴۰	۳۶۳/۳۶
	RBF	Spline with Tension	۱۲/۳۳-	۵۸۳/۲۵	۰/۴۴	۰/۵۲	۴۴/۴۹
	OK	Stable	۱۷/۹۲	۶۱۲/۷۷	۰/۳۸	۰/۴۹	۳۸/۲۲
	SK	Circular	۱۲/۰۲	۵۸۰/۷۰	۰/۵۱	۰/۵۶	۵۱/۲۸
	UK	Stable	۱۷/۹۲	۶۱۲/۷۷	۰/۳۸	۰/۴۹	۳۸/۲۲



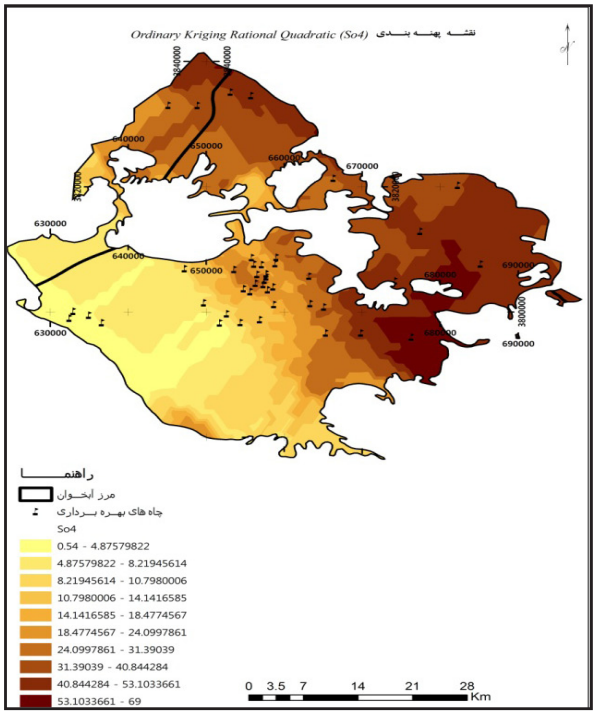
شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی پارامتر کیفی Ca آب زیرزمینی در دشت گناباد



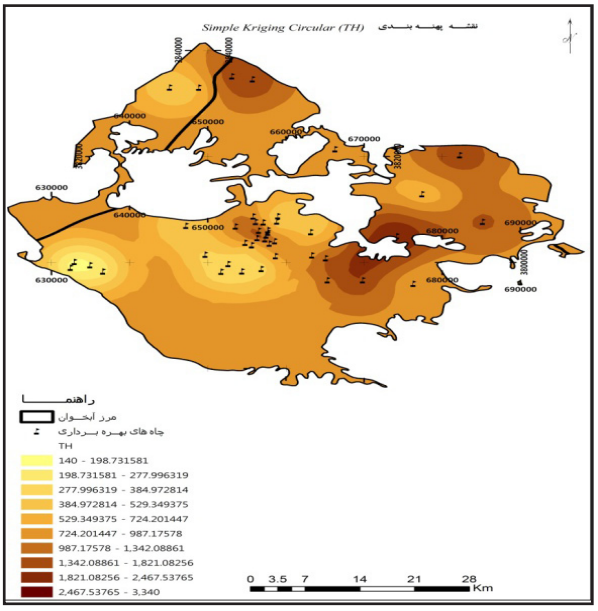
شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی پارامتر کیفی Mg آب زیرزمینی در دشت گناباد



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی پارامتر کیفی PH آب زیرزمینی در دشت گناباد



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی پارامتر کیفی So۴ آب زیرزمینی در دشت گناباد



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی پارامتر کیفی TH آب زیرزمینی در دشت گناباد

بنابراین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ و نقشه‌های پهنه‌بندی شدهٔ دشت، بهترین روش‌های زمین‌آمار برای هر یک از پارامترهای Ca،Mg،pH،TH و So۴ به ترتیب به صورت روش کریجینگ ساده مدور[1]، کریجینگ ساده کی- بسل، کریجینگ ساده کی- بسل [2]، کریجینگ ساده مدور، کریجینگ معمولی درجه دوم گویا[3] انتخاب گردیدند.

بحث

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های مورد بررسی دارای چولگی بالایی بودند که با بهره‌گیری از لگاریتم، داده‌ها تا حد زیادی نرمال شدند و بعد از نرمال‌سازی داده‌ها، بهترین روش زمین‌آمار برای منطقه در هر یک از پارامترها به دست آمد.

همچنین بهترین روش‌های درون‌یابی برای هر یک از پارامترهای کیفی، انواع روش‌های کریجینگ بود. دلیل این امر این است که مقدار خطاهای تخمین زده شده، کمتر از سایر روش‌ها و همچنین میزان همبستگی در این روش‌ها بیشتر از مابقی

1. Simple Kriging Circular
2. Simple Kriging K-Bessel
3. Ordinary Kriging Rational Quadratic

است ؛ معصومی نیز در مطالعه خود با عنوان استفاده از محاسبات فازی در مدلسازی نا اطمینانی ها در تخمین مقادیر، از روش کریجینگ برای تخمین مقدار سدیم در آبخوان زنجان استفاده کرد. در این مطالعه روش‌های کریجینگ و کریجینگ فازی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشاندهنده ی بهبود دقت تخمین روش کریجینگ فازی نسبت به روش کریجینگ معمولی بود(۱۷). اما این دو مطالعه با مطالعه کاظمی که روش کوکریجینگ را در تخمین پارامتر شوری خاک دارای بیشترین دقت و کمترین انحراف معرفی کرد (۱۸) و نیز با مطالعه Holdaway با عنوان مدلسازی و درون یابی مکانی دمای ماهیانه با استفاده از روش کریجینگ معمولی که کاربرد این روش برای درون یابی تغییرات دمای ماهیانه مناسب اعلام نکرد(۱۹)، تطابق ندارد. مطالعه کنونی با مطالعه عادلی مطابقت دارد به گونه ای که عادلی در پژوهش خود با عنوان ارزیابی کیفی منابع آب شهرستان گرگان با استفاده از GIS و زمین آمار، روش‌های مختلف درون یابی از جمله روش وزن دهی معکوس فاصله و کریجینگ با توابع مختلفی از جمله نمایی، کروی و معمولی برای هر پارامترکیفی آب بطور جداگانه تست و بر اساس فاکتورهایی از جمله خطای بایاس میانگین، خطای مربع میانگین، خطای قدر مطلق میانگین و خطای مجذور میانگین استاندارد شده ارزیابی نمود. نتایج عادلی نشان داد در دو روش کریجینگ کروی و نمایی مقادیر MAE و MBE در مورد اکثر پارامترهای استفاده شده نزدیک به هم؛ و مقادیر خطا در روش وزن دهی معکوس فاصله در اکثر مواقع از هر دو روش کریجینگ بالاتر بود. دقت هر سه روش وزن دهی معکوس فاصله و کریجینگ با توابع نمایی و کروی قابل قبول بوده اما روش کریجینگ با توابع نمایی و کروی در مجموع دارای دقت بالاتری هستند(۲۰). همچنین نتایج این مطالعه با مطالعات سلیمانی (۷) و مهرجردی(۲۱) و نیز Barca (۱۵) همخوانی دارد. لازم به ذکر است که کریجینگ، یک تخمینگر نا اریب با کمترین واریانس تخمین است. البته شرط نا اریب بودن در سایر روش‌های تخمین مانند عکس مجذور فاصله نیز اعمال می‌شود. ولی ویژگی کریجینگ در آن است که ضرایب i□ را به گونه‌ای تعیین می‌کند که در عین نا اریب بودن، واریانس تخمین نیز حداقل باشد. بنابراین کریجینگ، همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز می‌دهد و به این ترتیب نه فقط می‌توان مقدار متوسط خطاها را محاسبه کرد، بلکه می‌توان توزیع خطاها را در کل محدوده مورد بررسی به دست آورد. با استفاده از این ویژگی منحصر به فرد کرجینگ می‌توان قسمت‌هایی را که در آنجا خطا بالاست و برای کاهش آن به داده‌های بیشتری نیاز است، مشخص نمود و تحت پوشش لازم قرار داد.

همچنین با توجه به شکل‌های پهنه‌بندی شده برای هر یک از پارامترهای TH ،pH ،Mg و So۴ به ترتیب به صورت روش کریجینگ ساده مدور، کریجینگ ساده کی- بسل، کریجینگ ساده کی- بسل ، کریجینگ ساده مدور، کریجینگ معمولی درجه دوم گویا که به عنوان بهترین روش‌های زمین آمار انتخاب گردید. دلیل این امر این است که مقدار خطاهای تخمین زده شده کمتر از سایر روش‌ها و همچنین میزان همبستگی در این روش از سایر روش ها بیشتر است. با حرکت از شمال و شمال شرق و شرق دشت به طرف مرکز، جنوب و جنوب غربی دشت غلظت و تراکم کلیه پارامترها کاهش می‌یابد که این امر، خود حاکی از کاهش کیفیت آب در منطقه شمال و شمال شرق و شرق دشت گناباد نسبت به مناطق دیگر دشت است.

نتیجه‌گیری: با توجه به آنچه بیان شد، روش‌های آماری به منظور تحلیل نتایج حاصل از تجزیهٔ نمونه‌های آب زیرزمینی مناسب هستند، اما نباید جایگزین روش‌های اصلی تحلیل کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی شوند، بلکه باید به عنوان یک ابزار کمکی به کار گرفته شوند. تلفیق روش‌های آماری و هیدروشیمیایی، باعث حفظ مزایا و کاهش محدودیت‌های آنها می‌شود.

تشکر و قدردانی

در این بخش از زحمات و همکاری شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی به دلیل همکاری در ارائه اطلاعات و داده‌ها سپاسگزاری و قدردانی می‌شود

Reference

1. Ayobi S, Hosseinalizadeh M. Assessment Spatial Variability of Soil Erodibility By Using of Geostatistic and GIS (Case Study Mehr Watershed of Sabzevar). Iranian Journal of Natural Resources 2007;60(2):369 - 82.
2. Shabani M. Determination of the Most Suitable Geostatistical Method for The pH and TDS Mapping of Groundwater Resources (Case Study: The Arsanjan Plain). Water Engineering. 2009;1(1):47-57.
3. Annapoorna H, Janardhana Mr. Assessment of Groundwater Quality for Drinking Purpose In Rural Areas Surrounding a Defunct Copper Mine. Aquatic Procedia. 2015;4(0):685-92.
4. Zehtabian G, Janfaza E, Asgari Hm, Nematollahi M. Modeling of Ground Water Spatial Distribution for Some Chemical Properties (Case Study in Garmsar Watershed). Iranian Journal of Range and Desert Research. 2010;17(1):61-73.
5. Nsw Tdoeac. Guidelines for the Assessment and Management of Groundwater Contamination Website:www.environment.nsw.gov.au: Department of Environment and Conservation Nsw; 2007.
6. D'agostino V, Greene E, Passarella G, Vurro M. Spatial and Temporal Study of Nitrate Concentration in Groundwater by Means of Coregionalization. Environmental Geology. 1998;36(3-4):285-95.
7. Soleimani K, Zandi J, Zandi S. Evaluation of Geostatical Methods Efficacy for pH and TDS Mapping of Springs (Case Study: Watershead of Mirde, Kordestan). Quarterly Journal of Environmental Studies. 2012;38(64):57-66.
8. Jafarzadehhaghighifard N, Hasani A, Zinadinii A, Hassibi A. Investigation of the Adverse Effects on Water Quality Conditions of Illogical Use of Ground Water Resources at Anar Region in Kerman Province. Journal of Environmental Science and Technology. 2005 (24): 77 - 86.
9. Modeling of Ground Water Spatial Distribution for Some Chemical Properties (Case Study in Garmsar Watershed). Iranian Journal of Range and Desert Research. 2010;17(1):61-73.
10. Osati K, Salajegheh A, Arekhi S. Spatial Variation of Nitrate Concentrations in Groundwater by Geostatistics (Case Study: Kurdan Plain). Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources). 2013;65(4):461 - 72.
11. Adhikary PP, Dash Cj, Chandrasekharan H, Rajput T, Dubey S. Evaluation of Groundwater Quality for Irrigation and Drinking Using GIS and Geostatistics in a Peri-Urban Area of Delhi, India. Arabian Journal of Geosciences. 2012;5(6):1423-34.
12. Finke P, Brus D, Bierkens M, Hoogland T, Knotters M, De Vries F. Mapping Groundwater Dynamics Using Multiple Sources of Exhaustive High Resolution Data. Geoderma. 2004;123(1):23-39.
13. Baalousha H. Assessment of a Groundwater Quality Monitoring Network Using Vulnerability Mapping and Geostatistics: A Case Study From Heretaunga Plains, New Zealand. Agricultural Water Management. 2010;97(2):240-6.
14. Hooshmand A, Delghandi M, Izadi A, Aali A. Application of Kriging and Cokriging in Spatial Estimation of Groundwater Quality Parameters. African Journal of Agricultural Research. 2011;6(14):3402-8.
15. Barca E, Passarella G. Spatial Evaluation of the Risk of Groundwater Quality Degradation. A Comparison between Disjunctive Kriging and Geostatistical Simulation. Environmental Monitoring and Assessment. 2008;137(1-3):261-73.
16. Hasanipak Aa. Earth Statistics (Geostatistical): Tehran University; 1998.
17. Masoomi Z, Menhaj Mb, Sadimesgari M, Farnaghi M. Using Fuzzy Computation in Modelling Uncertainties in Kriging Estimation Method, Case Study: Estimation of Sodium Spatial Dispersion in Zanjan Aquifer. Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering (Amirkabir). 2011;43(1):69 - 78.
18. Kazemizarioun M, Nazemi A, Ashrafsadroddini Sa, Ghorbani Ma. Modeling Temporal and Spatial Variations of Soil Salinity in Downstream Lands of Hajilarchay Dam in East Azarbaijan Province Shahrekord University Electronic Journals 2013;7(12):21-31.
19. Holdaway Mr. Spatial Modeling and Interpolation of Monthly Temperature Using Kriging. Climate Research. 1996;6(3):215-25.
20. Adeli M. Evaluation of Ground Water Quality in Gorgan Township Using GIS and Geostatistics. Geographical Planning of Space Quarterly Journal. 2012;2(5):57-74.
21. Mehrjardi Rt, Jahromi Mz, Heidari A. Spatial Distribution of Groundwater Quality With Geostatistics (Case Study: Yazd-Ardakan Plain) 1. 2008.