Archive of SID

جغرافیـــا و برنامـــه‌ریـــزی محیطـــی
سال ۲۷، پیـاپی ۶۲، شـماره ۲، تابسـتان ۱۳۹۵

بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت زنجان از نظر استانداردهای شرب با استفاده از رویکرد زمین‌آمار

فاطمه عینلو*: دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه تهران، کرج، ایران
علی معافی رابری: دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
آرش ملکیان: استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
رضا قضاوی: دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
محسن محسنی ساروی: استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

وصـول: ۱۳۹۳/۷/۲ پـذیرش: ۱۳۹۴/۳/۱۹ ، صص ۱۶- ۱

چکیده

در بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی برای شناخت وضعیت کیفی آبخوان، منابع آلوده‌کننـده و تعیـین مناسب‌ترین راهکارهای مدیریتی، روش‌های زمین‌آماری و GIS ابزار مفیدی هستند. در ایـن پـژوهش، توزیـع پـارامترهـایی نظیر EC، TDS، TH و pH در منابع آب زیرزمینی دشت زنجـان بـا اسـتفاده از روش‌هـای زمـین‌آمـاری عکـس فاصـله (IDW)، توابع شعاعی(RBF)، تخمین‌گر موضعی (GPI)، تخمین‌گـر عـام (LPI) و روش کریجینـگ معمـولی (OK) در نرم‌افزار ArcGIS بر اساس نمونه‌های آب زیرزمینی ۳۴ حلقه چاه ارزیابی و نقشه‌های پراکنش مکانی هـر کـدام تهیـه شـد. پس از بررسی واریوگرام و مشخص‌شدن مکانی‌بودن تغییرات پارامترها، اقدام به میان‌یابی پارامترها شد و بـا اسـتفاده از روش اعتبارسنجی متقابل (CV) و ریشهٔ دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، بهترین مدل ارزیـابی بـا کمتـرین مقـدار RMSE انتخاب شد. نتایج نشان داد، پارامترهای EC و pH با استفاده از روش عکس فاصله و پارامترهای TH و TDS بـا اسـتفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی کمترین مقدار RMSE را داشته‌اند و برای تهیهٔ نقشهٔ توزیع مکانی پارامترهـای کیفیـت آب زیرزمینی از این روش‌ها استفاده شد. با توجه به استاندارد آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی و نقشه‌های به‌دسـت‌آمـده از زمین‌آمار، پارامتر pH در کل دشت برای شرب بدون محدودیت است و مقدار پارامتر EC در چهارچاه والایش، دیـزج‌آبـاد، زنجان و مهتر در جنوب شرقی، مرکز و شمال غربی دشت محدودیت دارد که ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در ایـن منطقـه است. مقدار پارامتر TDS بجز شمال شرقی در کل دشت دارای محدودیت زیاد از نظر مصرف شرب است. در تعـداد کمـی از چاه‌های دشت مقدار TH بدون محدودیت است و مقادیر این پارامتر در دشت زنجـان از نظـر شـرب محـدودیت ایجـاد می‌کند و از نظر سختی، آب کلیهٔ چاه‌ها در طبقهٔ سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی می‌شوند. به‌نظر می‌رسد، دلیل روند کـاهش کیفیت آب زیرزمینی برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و حفر چاه‌های غیرمجاز و گسترش فعالیت‌های صنعتی است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات مکانی، زمین‌آمار، دشت زنجان، کیفیت آب زیرزمینی، میانگین مربعات خطا

***نویسنده مسؤول:** fatemeeinlo@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

آب از نظر کمّی فراوان‌ترین مادهٔ کرهٔ زمین است، اما آب با کیفیت مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی بسیار محدود است. با افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، پیشرفت فناوری و تخلیهٔ بی‌رویهٔ پساب و فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی به منابع و ذخایر آبی موجود، امکان استفاده از آنها، روز به‌روز محدودتر و در مقابل، تقاضا برای استفاده از آنها بیشتر می‌شود (قبادی، ۱۳۸۹). امروزه در بیشتر نقاط جهان، آب زیرزمینی برای تأمین آب شیرین از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در کشور ایران و کشورهایی که آب و هوایی مشابه کشورمان دارند، آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منابع آب مورد استفاده در کشاورزی و شرب هستند (شعبانی، ۱۳۸۷). افزایش جمعیت و در نتیجهٔ آن، افزایش بهره‌برداری از این منابع ارزشمند باعث شده است، نه‌تنها کمیت منابع آب زیرزمینی کاهش یابد، بلکه کیفیت این منابع نیز رو کاهش شود. مهم‌ترین مشکلی که امروزه آب‌های زیرزمینی را تهدید می‌کند، آلوده‌شدن 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 بالابردن کیفیت آب زیرزمینی انجام داد (عسکری، ۱۳۸۸). برای رسیدن به این مهم، پایش و بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی کاری سخت و هزینه‌بر است و استفاده از روش‌های ارزان و در دسترس مثل زمین‌آمار[۱] شاخه‌ای از علم آمار کاربردی است که قادر به ارائهٔ مجموعهٔ وسیعی از تخمینگرهای آماری به‌منظور برآورد خصوصیت موردنظر در مکانی که نمونه‌برداری نشده با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از نقاط نمونه‌برداری‌شده است. با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌توان مقادیر عظیمی از داده‌ها را با سرعت زیاد و هزینهٔ بسیار کم، نگهداری و بازیابی کرد. همچنین استفاده از GIS[۲]، امکان تحلیل‌های زمین‌آماری را برای کاربر فراهم می‌کند (احمدی و صدق‌آمیز[۳]، ۲۰۰۸). این ابزار با تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی، کمک شایانی به تصمیم-گیری در فرآیندهای مدیریت کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی می‌کنند. در این راستا در داخل و خارج از کشور مطالعات گوناگونی در مورد کاربرد روش‌های میان‌یابی در مطالعهٔ آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است.

لی و همکاران[۴] (۲۰۰۳)، نتایج بهتری را از روش عکس فاصله در مقایسه با روش‌های دیگر در سئول کره جنوبی برای نقشه‌بندی مواد آلی و نیترات با توجه به معیار میانگین مجذور خطا به‌عنوان معیار مقایسه به‌دست آوردند. آندراده و استیگتر[۵] (۲۰۰۹) به بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات و علف‌کش‌ها در رودخانهٔ موندگو در مرکز پرتغال با استفاده از روش‌های زمین‌آماری پرداختند. آنها بر کارایی نقشهٔ احتمال آلودگی نیترات بالاتر از مقدار استانداردهای بین‌المللی با روش کریجینگ شاخص تأکید دارند.

۱- Geostatistic

2- Geographic Information System
3- Ahmadi and Sedghamiz
4- Lee et al
5- Andrade and Stigter

www.SID.ir

Archive of SID

دلبری و همکاران[1] (۲۰۱۳) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار در شهر شیراز پرداختند و برای میان‌یابی و تهیهٔ نقشه‌های پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از روش کریجینگ[2] استفاده کردند. کومار و همکاران[3] (۲۰۱۳)، به بررسی و آنالیز تغییرپذیری مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در پرودداتور هند اقدام کردند. تکنیک‌های ژئواستاتیکی مثل IDW[4]، RBF[5] و کریجینگ برای تولید نقشه‌ها استفاده شد و پارامترهای فیزیکوشیمیایی مثل pH، TH[6]، Ca^{+2}، Mg^{+2}، Cl^{-}، F^{-} و قلیاییت به‌صورت سیستماتیک ارزیابی و رفتار آماری آنها تحلیل شد. آدهیکاری و همکاران[7] (۲۰۱۴)، در بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقهٔ راجشاهی بنگلادش، از تکنیک‌های ژئواستاتیکی شناخته‌شده مثل کریجینگ استفاده کردند. در این بررسی معیارهای RMSE[8]، MAE[9]، R و RSS[10] برای تطبیق مدل و بهینه‌سازی پارامترها استفاده شدند. در نهایت مدل‌های انتخاب‌شده با استفاده از کریجینگ در محیط نرم‌افزار ArcGIS، برای تخمین سطح آب زیرزمینی و تعیین واریانس محاسبات استفاده و مناطق بحرانی از نظر میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی بر اثر بهره برداری تعیین شدند. طاهری تیزرو و همکاران[11] (۲۰۱۴)، در بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت زرین آباد زنجان، با استفاده از روش‌های کو کریجینگ[12]، کریجینگ و روش عکس فاصله به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ مطلوب‌ترین روش برای مطالعهٔ توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی است. ملکی گنادیشی و رهنما (۱۳۸۷)، در بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت زرند از منظر شرب با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آماری، بعد از طبقه‌بندی کلیهٔ پارامترهای کیفی آب دریافتند، در برخی مناطق، آب در حد استاندارد شرب نیست و برای تأمین آب آشامیدنی نیاز به تصفیهٔ آب یا انتقال از سایر مناطق است. شعبانی (۱۳۸۷)، در بررسی مناسب‌ترین روش زمین‌آماری برای تهیهٔ نقشهٔ تغییرات pH و TDS[13] آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان به این نتیجه رسید که روش‌های زمین‌آماری ساده و معمولی نسبت به روش‌های معین، برتری داشته‌اند. عسکری و همکاران (۱۳۸۸)، با تحلیل‌های زمین‌آماری در دشت قزوین نشان دادند، روش RBF نسبت به دیگر روش‌های درون‌یابی، نتایج بهتری نشان می‌دهد. رستمی و همکاران (۱۳۹۰)، در شهر مشهد نشان دادند، یون سولفات با استفاده از روش تخمین‌گر موضعی، کمترین مقدار RMSE را دارد و برای تهیهٔ نقشهٔ توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش استفاده شد. صاحب‌جلال و همکاران (۱۳۹۰)، به‌منظور پهنه‌بندی خصوصیات کیفی آب

1- Delbari et al
2- Kriging
3- Kumar et al
4- Inverse Distance Weights
5- Radial Basis Function
6- Total Hardness
7- Adhikary et al
8- Root Mean Square Deviation
9- Mean Absolute Error
10- Residual Sums of Squares
11- Tizro
12-Co Kriging
13-Total Dissolved Solids

www.SID.ir

Archive of SID

زیرزمینی مانند EC، SAR[1]، Cl و B و همچنین بررسی روند شوری آب زیرزمینی در یک دورهٔ پنج‌ساله با استفاده از نمونه‌های تعداد ۳۸ حلقه چاه از روش درون‌یابی کریجینگ استفاده کردند. اوسطی و همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از نمونه‌های آب زیرزمینی ۵۲ حلقه چاه، تغییرات مکانی میزان نیترات را در آب‌های زیرزمینی منطقهٔ کردان بررسی کردند و با مقایسهٔ روش‌های میانگین متحرک وزنی (IDW)، کریجینگ معمولی و تابع شعاعی پایه (RBF)، به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ کمترین خطا را دارد و از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. آنها نشان دادند، غلظت نیترات در مناطق با قابلیت نفوذ بالا و شیب کم در کاربری کشاورزی، بالاترین مقدار را داشته است. پژوهش حاضر در تلاش است تا ضمن مقایسهٔ روش‌های مختلف زمین‌آماری و تعیین بهترین روش تخمین، با استفاده از GIS، تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی را در دشت زنجان برای مصرف شرب از نظر استانداردهای مختلف پهنه‌بندی کند.

مواد و روش‌ها

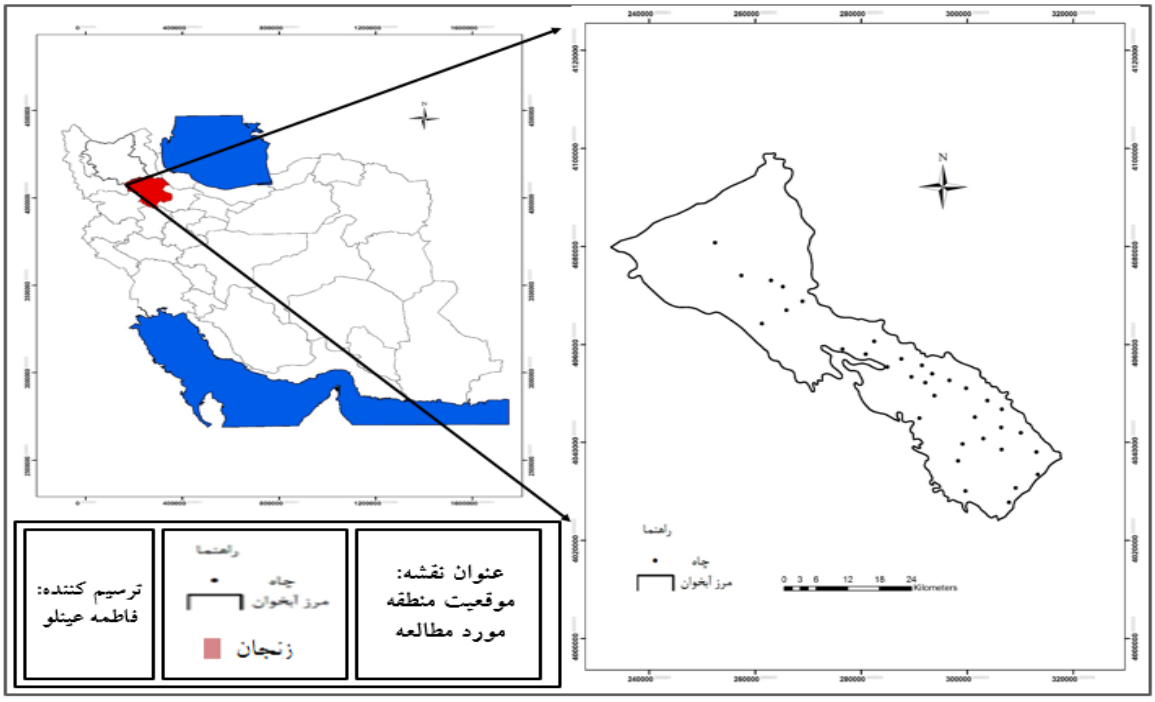
منطقهٔ مورد مطالعه

دشت زنجان در شمال غرب ایران و شرق رودخانهٔ قزل‌اوزن و بین ۴۸ تا ۴۹ درجه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی واقع است. این منطقه در حوزهٔ آبخیز زنجان‌رود قرار دارد و به نام دشت زنجان معروف است. مساحت کل این محدوده ۴۷۰۵ کیلومترمربع است که ۳۰۳۸ کیلومترمربع آن را ارتفاعات و ۱۶۶۷ کیلومترمربع آن را منطقه دشتی تشکیل داده است. در شکل ۱ موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه آورده شده است.

1-Sodium Absorption Ratio

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه و محل چاه‌ها

از کل مساحت دشت، ۱۲۰۰ کیلومترمربع آن مساحت آبخوان و معادل ۷۱/۹ درصد کل مساحت دشت و ۲۵/۵ درصد کل حوضهٔ مطالعاتی است. رودخانهٔ اصلی این محدوده زنجان‌رود نامیده می‌شود که از شرق به غرب جاری است و رودخانه و مسیل‌های کوچک و بزرگ چندی به آن منتهی می‌شود.

متوسط دمای سالانهٔ منطقهٔ مورد مطالعه ۱۰ درجه سانتی‌گراد و متوسط تعداد روزهای یخبندان ۱۱۷ روز و متوسط تبخیر و تعرق سالانه ۱۰۲۵ میلی‌متر است. از نظر تشکیلات زمین‌شناسی، دشت مورد مطالعه، بر روی رسوبات کواترنری واقع شده و با رشته‌کوه‌های سلطانیه و طارم احاطه شده است. این ارتفاعات از نظر زمین‌شناسی شامل سازندهای پرکامبرین و دوران اول و دوم است که به‌صورت هورست[۱]، در دوران سوم بالا آمده است (تماب،۱۳۷۰).

روش زمین‌آمار

در بررسی‌های آمار کلاسیک، نمونه‌های به‌دست‌آمده از جامعه، عمدتاً به‌صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شوند و مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ یک کمیت معین در یک نمونهٔ خاص، هیچ‌گونه اطلاعاتی دربارهٔ مقدار همان کمیت در نمونهٔ دیگر و به‌فاصلهٔ معلوم نخواهد داشت. در صورتی که در زمین‌آمار، بین مقادیر یک کمیت در جامعه، نمونه‌ها، فاصله و جهت قرارگرفتن نمونه‌ها نسبت به هم ارتباط برقرار می‌شود. همچنین در آمار کلاسیک، فرض می‌شود که تغییرپذیری یک متغیر تصادفی است. در صورتی که در زمین‌آمار،

۱ - Horst

www.SID.ir

Archive of SID

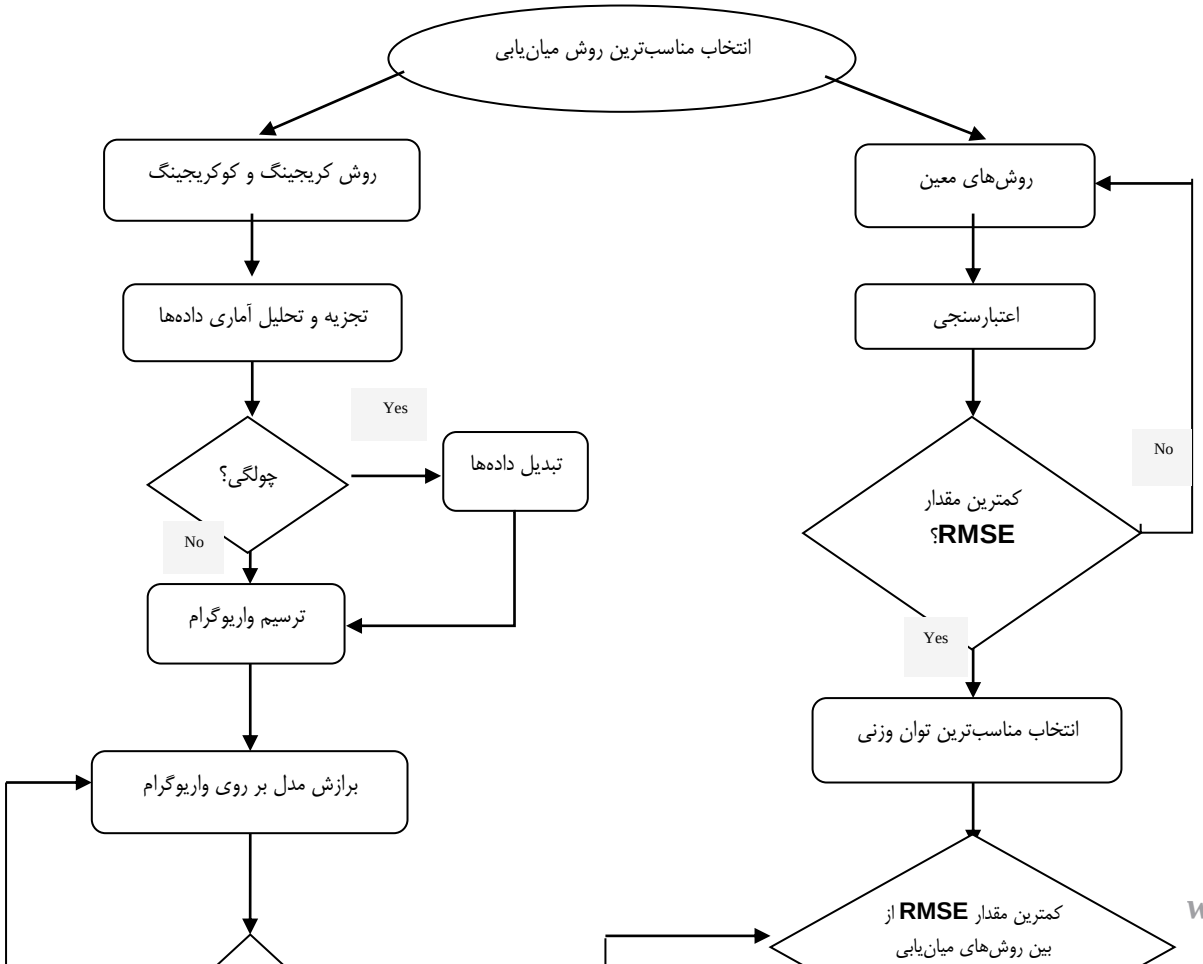
بخشی از آن تصادفی و بخش دیگر آن دارای ساختار و تابع فاصله و جهت است. بنابراین در زمین‌آمار ابتدا به بررسی وجود یا نبودِ ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار مکانی تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. زمین‌آمار شاخه‌ای از علم آمار است که مبتنی بر «نظریهٔ متغیرهای ناحیه‌ای» است. هر متغیری که در فضای سه‌بعدی توزیع شده باشد و دارای وابستگی مکانی باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شود و در مطالعات زمین‌آماری بحث و بررسی می‌گردد. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه، به دو مؤلفهٔ قطعی و تصادفی تجزیه می‌شود، بنابراین می‌توان نوشت:

$$Z(x)= m(x)+ L(x) \qquad (۱)$$

که در آن: $Z(x)$؛ متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای به مختصات(x)، $m(x)$؛ مؤلفهٔ قطعی متغیر ناحیه‌ای، $L(x)$؛ مؤلفهٔ تصادفی متغیر ناحیه‌ای است. در صورتی که متغیر ناحیه‌ای دارای ساختار مکانی مناسبی باشد، تحلیل‌های بسیاری را بر روی آن می‌توان به عمل آورد که از جمله آنها می‌توان به برآورد متغیر مورد نظر در نقاط بدونِ آمار و طراحی نمونه‌برداری اشاره کرد. تخمین زمین‌آماری شامل دو مرحله است: در مرحلهٔ اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که با آنالیز نیم تغییرنما قابل بررسی است. مرحلهٔ دوم تخمین متغیر موردنظر و به مرحلهٔ اول وابسته است. لازم به ذکر است، شرط استفاده از روش‌های زمین‌آماری، این است که داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک باشند.

ارزیابی صحت

برای ارزیابی دقت روش‌های به‌کار گرفته‌شده، از شیوهٔ ارزیابی متقابل استفاده شد که با استفاده از پارامتر RMSE دقت روش‌ها برآورد می‌شود. شکل ۲ روند اجرایی مطالعات زمین‌آماری و انتخاب بهترین مدل و روش میان‌یابی برای متغیر مورد نظر را نشان می‌دهد.



www.SID.ir

Archive of SID

شکل۲- روند اجرایی مطالعات زمین‌آماری و انتخاب بهترین مدل و روش میان‌یابی برای متغیر

بررسی تغییرات مکانی داده‌ها

هر متغیر تصادفی را می‌توان به‌صورت دو مؤلفهٔ قطعی و تصادفی در نظر گرفت. به‌منظور تعیین میزان ارتباط مکانی یک متغیر تصادفی در زمین‌آمار از نیم‌تغییرنما استفاده می‌شود. نیم‌تغییرنما کمیتی برداری است که میزان ارتباط مکانی بین نقاط اندازه‌گیری‌شده را برحسب 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 به‌صورت رابطهٔ (۱) است:

رابطهٔ (۱)

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

که در آن: $\gamma(h)$: مقدار شبیه واریوگرام در فاصله (h)، $Z(x_i+h)$: مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ متغیر در مکان (x_i+h)، $Z(x_i)$: مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ متغیر در مکان x_i، n: تعداد اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در محدودهٔ مورد مطالعه است (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷).

در این پژوهش، پس از دریافت آمار از شرکت مدیریت منابع آب ایران، برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای TDS، TH، pH وEC، تعداد ۳۴ حلقه‌چاه از سطح دشت که نمایندهٔ منطقهٔ مورد مطالعه بودند، انتخاب شدند (شکل ۱). سپس روش‌های مختلف درون‌یابی با هم مقایسه شدند و بهترین روش انتخاب شد. درنهایت، بر اساس آن نقشهٔ پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی تهیه شد.

روش‌های مختلف درون‌یابی

www.SID.ir

Archive of SID

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

رابطهٔ (۲) $$\lambda_i = \frac{{D_i}^{-a}}{\sum_{i=1}^{n} {D_i}^{-a}}$$

که در آن، D_i= فاصلهٔ بین نقطهٔ برآوردشده و مقدار مشاهده‌شده در نقطهٔ **i**؛ **a**: تعداد نقاط مشاهده‌شده است. این روش دارای توان‌های مختلف است که در این پژوهش، توان ۱ تا ۴ و توان دارای کمترین خطا استفاده شد.

روش تخمین‌گر موضعی(GPI[۲]): این روش یک مدل رگرسیونی چندمتغیره بر اساس تمامی داده‌ها و یک سطح تفهیمی ایجاد و 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 توان‌های مختلفی دارد که در این پژوهش توان ۱ تا ۳ و توان دارای کمترین خطا استفاده شد.

روش تخمین‌گر عام (LPI[۳]): این روش یک دامنهٔ کوتاه از تغییرات در داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد و با فواصل همسایگی در پنجره مشترک حساس است. بدین‌گونه که پنجره حرکت می‌کند و مقادیر سطحی در مرکز هر پنجره در هر نقطه به‌وسیلهٔ برازش یک چندضلعی تخمین زده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به روش تخمین‌گر موضعی دارد. این دو روش هیچ فرضی برای داده‌ها نیاز ندارند.

روش توابع شعاعی(RBF[۴]): تابع شعاعی تابعی به‌صورت $\Phi j(X)=\Phi(X-Xj)$ است که وابسته به فاصله بین $x=R^d$ و نقطه ثابت $Xj \varepsilon R^d$ است. در این تابع Φ تابعی پیوسته و وابسته به هر زیرمجموعه $\Omega \varepsilon R^d$ است. R نشان‌دهندهٔ فاصلهٔ اقلیدسی بین هر جفت نقطه در مجموعهٔ Ω است. این روش دارای ۵ تابع کرنل (Completely Regularized Spline, Spline With Tension, Multiquadric, Inverse Multi-quadratic, Thin Plate Spline) است که در این پژوهش روش Inverse Multi-quadratic که دارای کمترین مقدار RMSE بود، انتخاب شد.

روش کریجینگ[۵]: کریجینگ یک روش تخمین و بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و بهترین تخمین‌گر خطی نااریب است. در صورتی که $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر در مکان (x_i)، Z_0 مقدار تخمین‌زده‌شدهٔ متغیر در نقطه (x_0) از ترکیب خطی رابطهٔ (۳) است:

رابطهٔ (۳)

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

که در آن: λ_i: وزن داده شده به متغیر x در نقطهٔ **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 (الیاس‌آذر، ۱۳۸۱).

برای ارزیابی روش‌های زمین‌آماری و انتخاب بهترین روش از نرم‌افزار ArcGIS که توانایی انجام

[۱]- Inverse Distance Weighting

[2]- Global Polynomial Interpolation

[3]- Local Polynomial Interpolation

[4]- Radial Basis Function

[۵]- Kriging

www.SID.ir

Archive of SID

تکنیک ارزیابی متقابل را دارد و معیار آماری ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد که محاسبهٔ آن به صورت رابطهٔ (۴) است:

رابطهٔ (۴)

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

که در آن: $\hat{Z}(x_i)$: مقدار برآوردشده در نقطهٔ x_i، $Z(x_i)$: مقدار اندازه‌گیری‌شده در نقطهٔ x_i، i: شمارهٔ نقاط و n: تعداد نقاط مشاهده‌شده است.

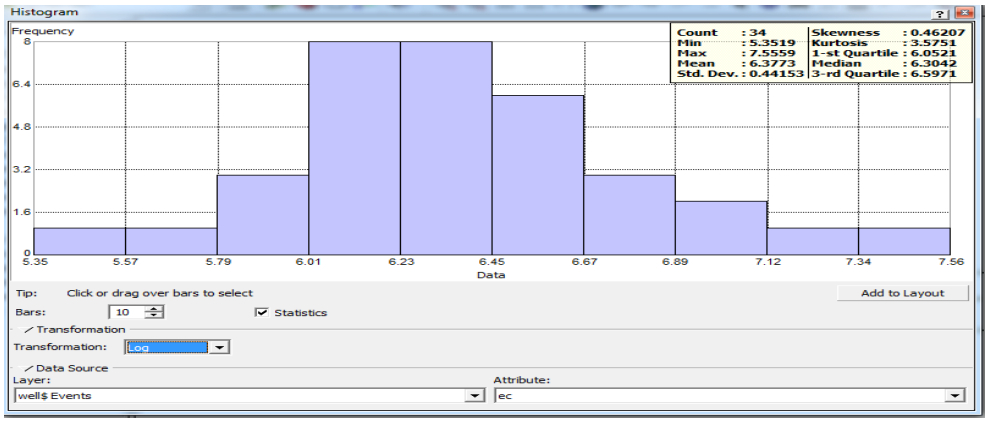
در این روش در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیهٔ نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای کلیهٔ نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌گردد و در پایان به ازای هر نقطهٔ مشاهده‌ای یک نقطه برای برآورد وجود خواهد داشت.

نتایج و بحث

استفاده از روش‌های زمین‌آماری مستلزم بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌هاست که با آنالیز واریوگرام این امر بررسی می‌شود و شرط استفاده از این آنالیز، نرمال‌بودن داده‌هاست. هیچ‌کدام از پارامترهای استفاده‌شده در این پژوهش با توجه به هیستوگرام داده‌ها نرمال نبودند و دارای چولگی بودند که با گرفتن لگاریتم از داده‌ها نرمال شدند. برخی از خصوصیات آماری مربوط به جامعهٔ آماری نرمال‌شده در جدول ۱ و هیستوگرام نرمال‌شده پارامتر EC برای نمونه در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج آنالیز آماری پارامترهای مورد بررسی (نرمال‌شده)

متغیر مورد بررسی	تعداد نمونه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	میانه
EC(mmhos/cm)	۳۴	۵/۳۵	۷/۵۵	۶/۳۷	۰/۴۴	۰/۴۶	۳/۵۷	۶/۳۰
TDS(mg/l)	۳۴	۴/۸۸	۷/۰۹	۵/۹۱	۰/۴۴	۰/۴۶	۳/۵۷	۵/۸۴
pH	۳۴	۱/۹۶	۲/۱۰	۲/۰۶	۰/۰۲	-۱/۵۲	۵/۸۶	۲/۰۵
TH(mg/l)	۳۴	۴/۵۵	۶/۳۹	۵/۲۶	۰/۳۸	۰/۵۶	۳/۷۷	۵/۲۴

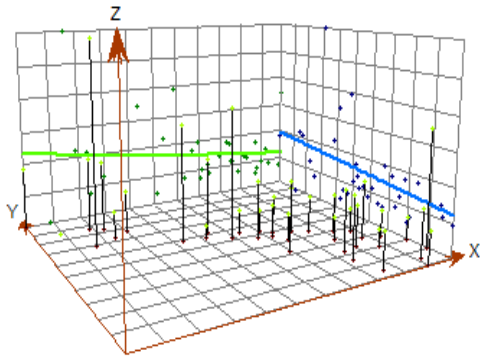


شکل ۳- هیستوگرام نرمال‌شدهٔ داده‌های مربوط به EC

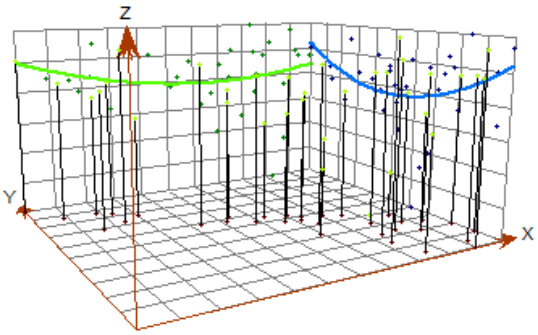
www.SID.ir

Archive of SID

بررسی روند تغییرات مکانی در دشت مورد مطالعه نشان می‌دهد، غلظت EC، TDS و TH از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی- جنوبی نیز به‌صورت خطی افزایش می‌یابد که با نقشه‌های استخراجی مطابقت دارد (شکل۴). روند تغییرات مکانی pH در دشت زنجان نشان می‌دهد، مقدار آن از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی- جنوبی دارای منحنی تغییرات Uشکل است که با نقشه‌های استخراجی مطابقت دارد (شکل۵). مقادیر سمی واریوگرام ترسیم‌شده نشان‌دهندهٔ اختلاف مقادیر EC بین زوج نقاط در فواصل مختلف (دور تا نزدیک) هستند، همچنین این شکل مقادیر سمی واریوگرام نمونه‌های EC 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 مکانی‌بودن تغییرات است؛ یعنی با افزایش فاصله نقاط اختلاف داده‌ها افزایش یابد و در شعاع تأثیر مشخصی واریانس داده‌ها ثابت شود. از دیگر تحلیل-های ممکن از مقادیر سمی واریوگرام، تعیین موقعیت پارامتر و توزیع نقاط زوج با فاصلهٔ کم و تغییرات بالا و توزیع نقاط زوج با فاصلهٔ زیاد و تغییرات بالاست (برای نمونه شکل‌های ۶ و ۷).



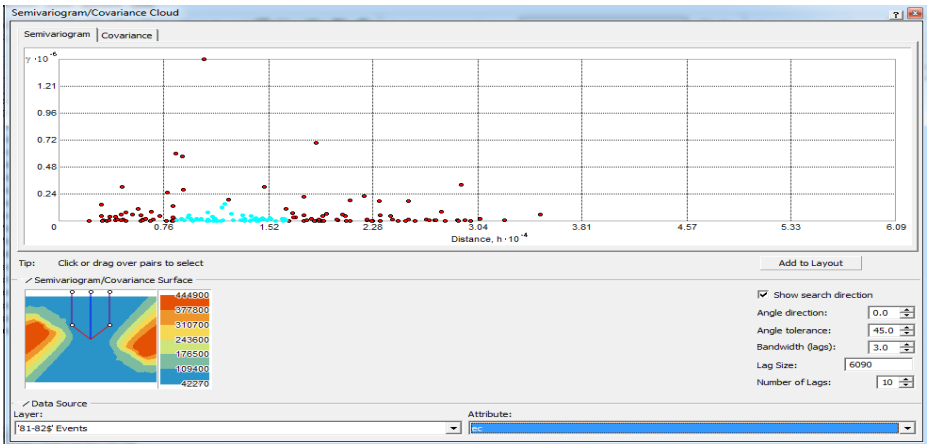
شکل ۴- روند تغییرات مکانی غلظت TH، EC و TDS از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی- جنوبی (خط با شیب افزایشی)



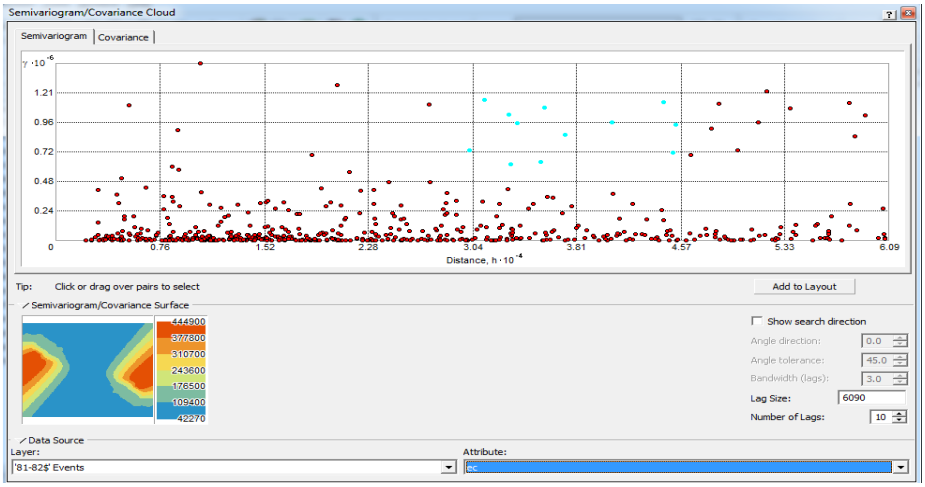
شکل۵- روند تغییرات مکانی غلظت PH از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی- جنوبی دارای منحنی تغییرات Uشکل

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۶- مقادیر سمی‌واریوگرام پارامتر EC از مرکز به شمال دشت و توزیع نقاط زوج با فاصلهٔ کم و تغییرات بالا



شکل ۷- مقادیر سمی‌واریوگرام پارامتر EC و توزیع نقاط زوج با فاصلهٔ زیاد و تغییرات بالا

مناسب‌ترین روش میان‌یابی

برای تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی در بین روش‌های زمین‌آماری از مجذور میانگین مربعات خطا[1] استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای TDS و TH با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی و تابع کرنل[2] کمترین مقدار RMSE را داشته‌اند و پارامتر pH و EC با استفاده از روش عکس فاصله توان یک، کمترین مقدار RMSE را داشته است. برای تهیهٔ نقشهٔ توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش‌ها استفاده شد (جدول ۲).

جدول ۲- مقادیر RMSE پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری

روش‌های مختلف زمین‌آمار	RMSE			
	EC	TDS	PH	TH
IDW	۳۴۸/۸	۲۳۹/۸	۰/۲۱۵	۱۰۷/۷
GPI	۳۷۶/۴	۲۳۵/۸	۰/۲۲۶	۱۰۵/۶
LPI	۴۰۸/۳	۲۵۷/۱	۰/۲۴۶	۱۳۱/۹
RBF	۳۸۰/۷	۲۱۹/۷	۰/۲۲۱	۹۷/۸۶
Kriging	۴۱۸/۳	۲۶۵/۵	۰/۲۲۴	۱۱۹/۱

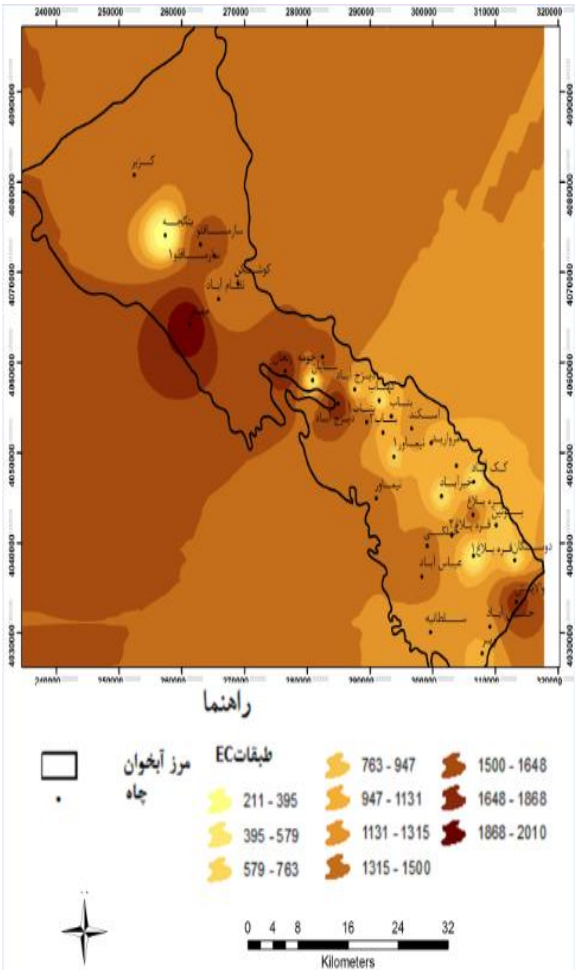
1- RMSE

2- Inverse Multi quadric

www.SID.ir

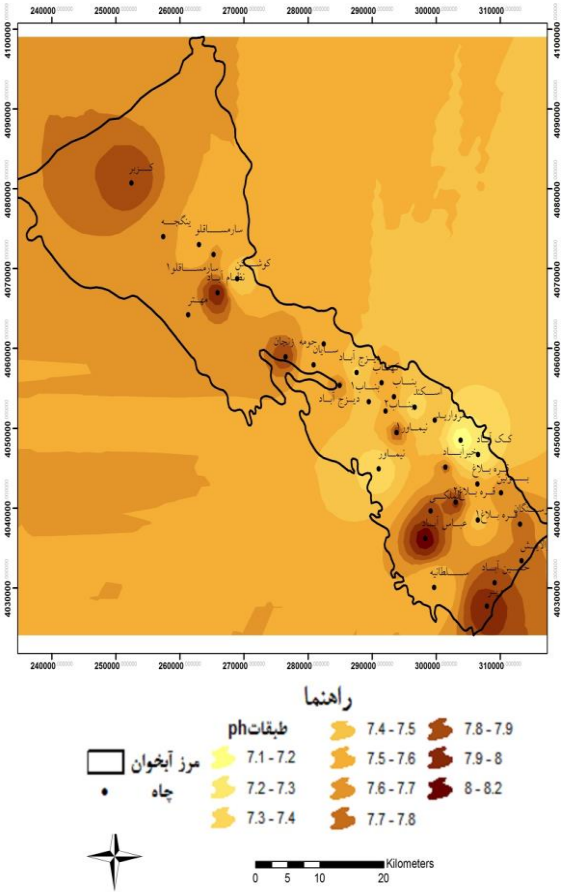
Archive of SID

۱- پارامتر 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 ۸ مشاهده می‌شود، چهار چاه والایش، دیزج‌آباد، زنجان و مهتر که در جنوب شرقی و مرکز و شمال غربی دشت واقع شده‌اند و مساحت کمی از دشت را به خود اختصاص داده‌اند، دارای محدودیت خیلی کم برای شرب هستند و در بقیهٔ مناطق مقدار EC کمتر از ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است که به لحاظ شرب محدودیتی ندارد.



شکل ۸- پهنه‌بندی پارامتر EC با استفاده از روش IDW

۲- پارامتر pH: با توجه به استانداردهای آب شرب که حداکثر مطلوب این پارامتر را بین ۷<pH<۸/۵ تعریف کرده‌اند (مهدوی، ۱۳۸۶) و با توجه به شکل ۹ که پهنه‌بندی آب زیرزمینی را در دشت زنجان نشان می‌دهد، هیچ محدودیتی به لحاظ شرب در این دشت وجود ندارد. از مرکز دشت به طرف جنوب شرق و شمال غرب، pH در حال افزایش و بقیهٔ قسمت‌ها در حال کاهش است.



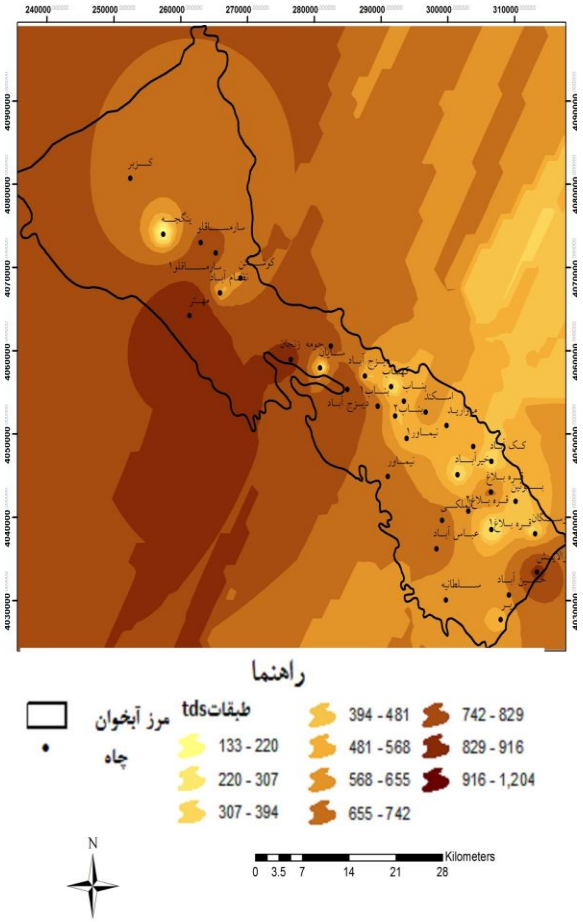
شکل ۹- پهنه‌بندی پارامتر pH با استفاده از روش IDW

۳- پارامتر TDS: با توجه به استانداردهای آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی، استاندارد اروپایی

www.SID.ir

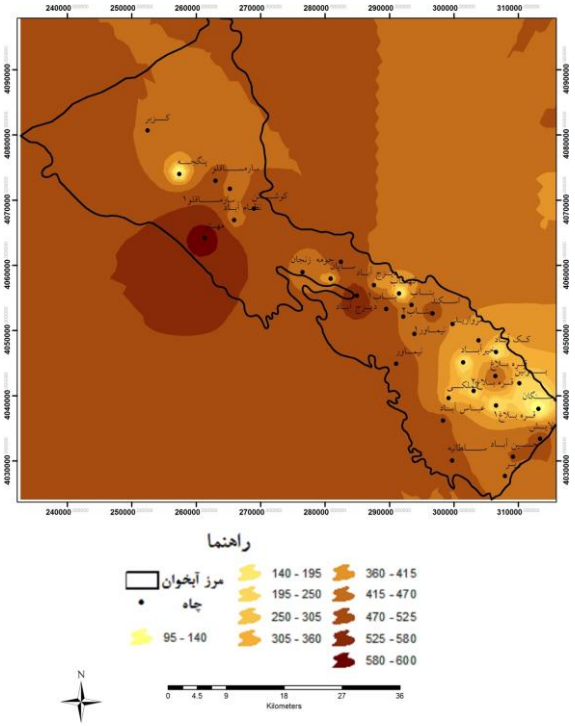
Archive of SID

۱۹۷۰ و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا ۱۹۷۵ مقدار توصیه‌شده باقی‌مانده خشک برای آب شرب ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر است (مهدوی،۱۳۸۶). با توجه به شکل ۱۰ که پهنه‌بندی پارامتر مورد نظر را نشان می‌دهد، از مرکز دشت به سمت شمال شرقی به‌دلیل خالی‌بودن این مناطق از سکنه، مقادیر باقی‌ماندهٔ خشک به مرور در حال کاهش است. در شمال غرب و جنوب غربی دشت مقادیر باقی‌مانده خشک افزایش یافته و دارای محدودیت برای شرب است. چاه والایش و مهتر دارای محدودیت زیادی برای شرب هستند.



شکل ۱۰- پهنه‌بندی پارامتر TDS با استفاده از روش RBF

۴- پارامتر TH: به توصیهٔ 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 ۱۱ که پهنه‌بندی پارامتر مورد نظر را نشان می‌دهد، در تعداد کمی از چاه‌های دشت، مقدار TH کمتر از ۳۶۰ میلی‌گرم بر لیتر ثبت شده است؛ بنابراین با توجه به استاندارد سازمان بهداشت جهانی مقادیر این پارامتر در دشت زنجان به لحاظ شرب محدودیت ایجاد می‌کند. از نظر سختی، آب کلیهٔ چاه‌ها در طبقهٔ سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی می‌شوند.



شکل ۱۱- پهنه‌بندی پارامتر TH با استفاده از روش RBF

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد

www.SID.ir

Archive of SID

که روش‌های زمین‌آماری توانایی قابل ملاحظه‌ای در تحلیل مکانی خصوصیات آب زیرزمینی و پهنه‌بندی کیفیت آن دارند. نبودِ اطلاعات معتبر در کیفیت آب زیرزمینی معمولاً برای پایش کیفی منابع آب زیرزمینی محدودیتی جدی است. توسعهٔ سامانهٔ اطلاعات مکانی[1] در برنامه‌های مختلف آب شرب امری ضروری است. نمونه‌برداری از آب شرب و پایش آن باید در طراحی برنامه‌ها، اجرا و ارزیابی به‌عنوان عنصر اولیه قرار گیرد. سیستم اطلاعات مکانی بر اساس الگوی کیفیت آب زیرزمینی با شناخت الگوهای شیمیایی، در تفهیم فرآیندهای ژئوشیمیایی منطقه و برای مدیریت سلامت عمومی استفاده می‌شود. نتایج این بررسی نشان می‌دهد، مقدار EC و PH و TDS در جنوب شرقی و شمال غربی و جنوب غربی دشت زنجان بالاتر از مقدار استاندارد آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی است و نشان‌دهندهٔ تأثیرات بالای فعالیت‌های انسانی بر مقدار آنها در منطقهٔ مورد مطالعه است؛ بنابراین آب زیرزمینی دشت از فعالیت‌های انسانی و به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی تأثیر گرفته است. بررسی دقیق روند تغییرات مکانی در دشت نشان می‌دهد، در مناطق کم‌شیب با کاربری کشاورزی بیشترین مقادیر TDS و EC مشاهده شده است. مقادیر سمی‌واریوگرام ترسیم‌شده نشان‌دهندهٔ مکانی‌بودن تغییرات بودند. از تحلیل سمی‌واریوگرام چنین استنباط می‌شود که نقاط زوج با فاصلهٔ کم و تغییرات بالا در بخش کم‌شیب دشت هستند که با کاهش شیب توجیه می‌شود؛ یعنی آب فرصت بیشتری برای نفوذ خواهد داشت و بر این اساس افزایش مقدار پارامترها را داریم. توزیع نقاط زوج با فاصلهٔ زیاد و تغییرات بالا نشان‌دهندهٔ بالابودن مقادیر TDS و EC در کاربری کشاورزی و اختلاف قابل توجه مقادیر این پارامترها در آب زیرزمینی این مناطق نسبت به کاربری‌های روستایی است. در این پژوهش، روش‌های زمین‌آماری عکس فاصله (IDW) با توان (۱تا۴)، توابع شعاعی (RBF) (با پنج تابع کرنل)، تخمین‌گر موضعی (GPI) با توان (۱تا۳)، تخمین‌گر عام (LPI) با توان (۱تا۳) و روش کریجینگ معمولی (مدل‌های کروی، گوسی، نمایی) در نرم‌افزار Arc GIS ارزیابی شد. نتایج نشان داد، پارامترهای TDS و TH با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی و تابع کرنال کمترین مقدار RMSE را داشته‌اند و پارامتر EC و pH با استفاده از روش عکس فاصله کمترین مقدار RMSE را داشته است و برای تهیهٔ نقشهٔ توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش‌ها استفاده شد.

نتایج این پژوهش، بجز با نتایج پژوهش عسکری و همکاران (۱۳۸۸)، که روش RBF را بهترین روش معرفی می‌کند با هیچ‌کدام از پژوهش‌های انجام‌گرفته تا کنون که بیشتر روش کریجینگ را بهترین روش برای پهنه‌بندی معرفی می‌کنند، تطابق ندارد و روش‌های تخمین‌گر توابع شعاعی برای TDS و TH و روش عکس فاصله برای EC و pH را با توجه به مجذور میانگین مربعات خطا، بهترین روش‌ها برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی در دشت زنجان معرفی می‌کند. البته در بیشتر مطالعات قبلی برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی، فقط روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ را با هم مقایسه کرده‌اند که همین روش پژوهش (مقایسهٔ کریجینگ و کوکریجینگ) در انتخاب کریجینگ به‌عنوان بهترین روش میان‌یابی بی‌تأثیر نبوده

[1]- GIS

www.SID.ir

Archive of SID

است. برای مثال، لی و همکاران (۲۰۰۳) و رستمی و همکاران (۱۳۹۰) به‌ترتیب روش‌های عکس فاصله و تخمین‌گر موضعی را در مقایسه با سایر روش‌های زمین‌آماری برای پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی توصیه می‌کنند.

مقدار پارامتر EC برای آب شرب مورد استفادهٔ انسان در بیشتر موارد دارای هدایت الکتریکی بین ۵۰ تا ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است و با توجه به نقشه‌های استخراجی مشاهده می‌شود، چهار چاه والایش، دیزج‌آباد، زنجان و مهتر که در جنوب شرقی دشت و مرکز و شمال غربی دشت واقع شده‌اند، دارای محدودیت کم برای شرب هستند که ممکن است، ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه باشد و در بقیهٔ مناطق مقدار EC کمتر از ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است که به لحاظ شرب محدودیتی ندارد.

مقدار پارامتر pH با توجه به نقشه‌های استخراجی و استانداردهای آب شرب که حداکثر مطلوب این پارامتر را بین ۷<pH<۸/۵ تعریف کرده‌اند، پارامتر pH در کل منطقه به‌لحاظ مصرف آب شرب بدون محدودیت است.

مقدار پارامتر TDS با توجه به استانداردهای آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی، استاندارد اروپایی (۱۹۷۰) و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا و با توجه به نقشهٔ پهنه‌بندی پارامتر مورد نظر، نشان می‌دهد که از مرکز دشت به سمت شمال شرقی به‌دلیل خالی‌بودن این مناطق از سکنه، مقادیر باقی‌مانده خشک به مرور در حال کاهش است. در شمال غرب و جنوب غربی دشت مقادیر باقی‌مانده خشک افزایش می‌یابد و دارای محدودیت برای شرب است. چاه والایش و مهتر دارای محدودیت زیادی برای شرب هستند و مقدار پارامتر TDS بجز شمال شرقی در کل دشت، دارای محدودیت زیاد از نظر مصرف شرب است. مقدار پارامتر TH با توجه به توصیهٔ سازمان بهداشت جهانی (W.H.O) و بر اساس نقشهٔ پهنه‌بندی پارامتر موردنظر نشان می‌دهد که در تعداد کمی از چاه‌های دشت، مقدار TH کمتر از ۳۶۰ میلی‌گرم بر لیتر ثبت شده است، بنابراین تعداد کمی از چاه‌های دشت از نظر مقدار TH محدودیت کمی دارند و مقادیر این پارامتر در دشت زنجان به لحاظ شرب محدودیت ایجاد می‌کند و به لحاظ سختی، آب کلیهٔ چاه‌ها در طبقهٔ سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی می‌شوند.

منابع

حسنی‌پاک، علی‌اصغر، (۱۳۷۷). زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۳ص.

مهدوی، محمد، (۱۳۸۶). هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، جلد دوم، ۴۴۱ص.

قبادی، محمدحسین، (۱۳۸۹). آب‌های زیرزمینی، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، ۳۰۳ صفحه.

الیاس‌آذر، خسرو، (۱۳۸۱). اصلاح خاک‌های شور و سدیمی (مدیریت خاک وآب)، انتشارات جهاد دانشگاهی، صفحهٔ ۳۰۰.

صاحب‌جلال احسان، فرهاد، دهقانی، منیرالسادات طباطبایی‌زاده، (۱۳۹۲). تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ (مطالعهٔ موردی: دشت بهادران مهریز)، مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۶۵: ۶۱-۵۱.

رستمی‌خلج، محمد، محسن، محسنی‌ساروی، رشید،

www.SID.ir

Archive of SID

افشارنیا، دانا، حسامی، (۱۳۹۰). بررسی توزیع مکانی برخی از خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های معین (مطالعهٔ موردی: حوزهٔ شهری مشهد)، مجموعه‌مقالات هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان.

اوسطی، خالد، علی، سلاجقه، صالح، آرخی، (۱۳۹۱). تغییرات مکانی میزان نیترات در آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار (مطالعهٔ موردی دشت کردان)، نشریهٔ مرتع و آبخیزداری، مجلهٔ منابع طبیعی ایران، دورهٔ ۶۵، شمارهٔ ۴، شماره ص ۴۷۲-۴۶۱.

شعبانی، محمد، (۱۳۸۷). تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آماری در تهیهٔ نقشهٔ تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: دشت ارسنجان)، مجلهٔ مهندسی آب، ص ۵۸-۴۷.

ملکی‌گنادیشی، فاطمه، محمدباقر، رهنما، عباس، رضایی، (۱۳۸۷). ارزیابی کیفی آب زیرزمینی جهت تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی با استفاده از روش کریجینگ و نرم‌افزار Gs^+ (مطالعهٔ موردی: دشت زرند)، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران.

عسکری، معصومه، ابوالفضل، مساعدی، امیراحمد، دهقانی، مهدی، مفتاح‌هلقی، (۱۳۸۸). بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی به‌وسیلهٔ تحلیل‌های زمین‌آماری و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعهٔ موردی: دشت قزوین)، کنفرانس بین‌المللی منابع آب با رویکرد منطقه‌ای، دانشگاه فردوسی مشهد.

Adhikary, S. K., A. A. Sharif., S. K. Das and G. C. Saha. 2014. Goestatistical analysis of groundwater level fluctuations in the shallow aquifer shallow aquifer of northwestern Bangladesh. Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD-2014), 14~16 February 2014, KUET, Khulna, Bangladesh.

Ahmadi, S. H., and A. Sedghamiz. 2008. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. Environ Monit Assess. 138:357–368.

Andrade A.I.A.S.S. , T.Y. Stigter, 2009, Multi-method assessment of nitrate and pesticide contamination in shallow alluvial groundwater as a function of hydro geological setting and land use, Agricultural Water Management, AGWAT-2849; No of Pages 15.

Delbari,M. Motlagh,B.M. and Amiri,M.(2013), Investigating spatio-temporal variability of groundwater quality parameters using geostatistics and GIS. International Research Journal of Applied and Basic Sciences.ISSN 2251-838X / Vol, 4 (12): 3623-3632.

Kumar, M. J., V. Sunitha, M. R. Ramakrishna. 2013. Determination of an optimal interpolation technique to represent the spatial distribution of groundwater quality at urban and peri-urban areas of Proddatur, Y.S.R district, Andhra Pradesh, India. International journal of geosciences, volume 4, No 2, 2013.

Lee SM, Min KD, Woo NC, Kim Yj, Ahn CH (2003). Statistical Models for the Assessment of Nitrate Contamination in urban Groundwater using GIS. J Environ Geol 44:210-221.

Tizro, T. A. Voudouris, K. and Vahedi, S. (2014), Spatial Variation of Groundwater Quality Parameters: A Case Study from a Semiarid Region of Iran. International Bulletin of Water Resources & Development. Vol. (I) – No. 03- winter 2014.

www.SID.ir