

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

وصول: ۱۳۹۳/۷/۲ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۱۹، صص ۱۶-۱

چکیده

در بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی برای شناخت وضعیت کیفی آبخوان، منابع آلوده‌کننده و تعیین مناسب‌ترین راهکارهای مدیریتی، روش‌های زمین‌آماری و GIS ابزار مفیدی هستند. در این پژوهش، توزیع پارامترهایی نظیر EC، TDS، TH و pH در منابع آب زیرزمینی دشت زنجان با استفاده از روش‌های زمین‌آماری عکس فاصله (IDW)، توابع شعاعی (RBF)، تخمین‌گر موضعی (GPI)، تخمین‌گر عام (LPI) و روش کریجینگ معمولی (OK) در نرم‌افزار ArcGIS بر اساس نمونه‌های آب زیرزمینی ۳۴ حلقه چاه ارزیابی و نقشه‌های پراکنش مکانی هر کدام تهیه شد. پس از بررسی واریوگرام و مشخص شدن مکانی بودن تغییرات پارامترها، اقدام به میان‌یابی پارامترها شد و با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل (CV) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، بهترین مدل ارزیابی با کمترین مقدار RMSE انتخاب شد. نتایج نشان داد، پارامترهای EC و pH با استفاده از روش عکس فاصله و پارامترهای TH و TDS با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی کمترین مقدار RMSE را داشته‌اند 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 به‌دست‌آمده از زمین‌آمار، پارامتر pH در کل دشت برای شرب بدون محدودیت است و مقدار پارامتر EC در چهارچاه والایش، دیزج‌آباد، زنجان و مهتر در جنوب شرقی، مرکز و شمال غربی دشت محدودیت دارد که ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه است. مقدار پارامتر TDS بجز شمال شرقی در کل دشت دارای محدودیت زیاد از نظر مصرف شرب است. در تعداد کمی از چاه‌های دشت مقدار TH بدون محدودیت است و مقادیر این پارامتر در دشت زنجان از نظر شرب محدودیت ایجاد می‌کند و از نظر سختی، آب کلیه چاه‌ها در طبقه سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی می‌شوند. به‌نظر می‌رسد، دلیل روند کاهش 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

مقدمه

آب از نظر کمی فراوان‌ترین ماده کره زمین است، اما آب با کیفیت مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی بسیار محدود است. با افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، پیشرفت فناوری و تخلیه بی‌رویه پساب و فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی به منابع ذخایر آبی موجود، امکان استفاده از آنها، روز به روز 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 نتیجه آن، افزایش بهره‌برداری از این منابع ارزشمند باعث شده است، نه تنها کمیت منابع آب زیرزمینی کاهش یابد، بلکه کیفیت این منابع نیز رو کاهش شود. 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 آلوده شده 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 را می‌طلبد. زمین‌آمار^۱ شاخه‌ای

از علم آمار کاربردی است که قادر به ارائه مجموعه وسیعی از تخمین‌گرهای آماری به‌منظور برآورد خصوصیت موردنظر در مکانی که نمونه‌برداری نشده با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از نقاط نمونه‌برداری شده است. 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^۲، امکان تحلیل‌های زمین‌آمار را برای کاربر فراهم می‌کند (احمدی و صدق‌آمیز^۳، ۲۰۰۸). این ابزار با تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی، کمک شایانی به تصمیم‌گیری 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 مطالعه آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است.

لی و همکاران^۴ (۲۰۰۳)، نتایج بهتری را از روش عکس فاصله در مقایسه با روش‌های دیگر در سؤال 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 رودخانه موندگو در مرکز پرتغال با استفاده از روش‌های زمین‌آماري پرداختند. آنها بر کارایی نقشه احتمال آلودگی نیترات بالاتر از مقدار استانداردهای بین‌المللی با روش کریجینگ شاخص تأکید دارند.

^۲- Geographic Information System

^۳- Ahmadi and Sedghamiz

^۴- Lee et al

^۵- Andrade and Stigter

^۱- Geostatistic

دلبری و همکاران^۱ (۲۰۱۳) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار در شهر شیراز پرداختند و برای میان‌یابی و تهیه نقشه‌های پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از روش کریجینگ^۲ استفاده کردند. کومار و همکاران^۳ (۲۰۱۳)، به بررسی و آنالیز تغییرپذیری مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در پروداتور هند اقدام کردند. تکنیک‌های ژئواستاتیکی مثل IDW^۴، RBF^۵ و کریجینگ برای تولید نقشه‌ها استفاده شد و پارامترهای فیزیکوشیمیایی مثل pH^۶، TH^۶، Ca^{۲+}، Mg^{۲+}، Cl⁻، F⁻ و قلیائیت به‌صورت سیستماتیک ارزیابی و رفتار آماری آنها تحلیل شد. آدهیکاری و همکاران^۷ (۲۰۱۴)، در بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه راجشاهی بنگلادش، از تکنیک‌های ژئواستاتیکی شناخته‌شده مثل کریجینگ استفاده کردند. در این بررسی معیارهای R^۲، MAE^۸، RMSE^۹ و RSS^{۱۰} 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^{۱۱} (۲۰۱۴)، در بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت زرین آباد زنجان، با استفاده از روش‌های کو کریجینگ^{۱۲}، کریجینگ و روش عکس فاصله به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ مطلوب‌ترین روش برای مطالعه 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 زمین‌آمار، بعد از طبقه‌بندی کلیه پارامترهای کیفی آب دریافتند، در برخی مناطق، آب در حد استاندارد شرب نیست و برای تأمین آب آشامیدنی نیاز به تصفیه آب یا انتقال از سایر مناطق است. شعبانی (۱۳۸۷)، در بررسی مناسب‌ترین روش زمین‌آمار برای تهیه نقشه تغییرات pH و TDS^{۱۳} آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان به این نتیجه رسید که روش‌های زمین‌آمار ساده و معمولی نسبت به روش‌های معین، برتری داشته‌اند. عسکری و همکاران (۱۳۸۸)، با تحلیل‌های زمین‌آمار 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 تهیه نقشه 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

کیلومترمربع آن را منطقه دشتی تشکیل داده است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

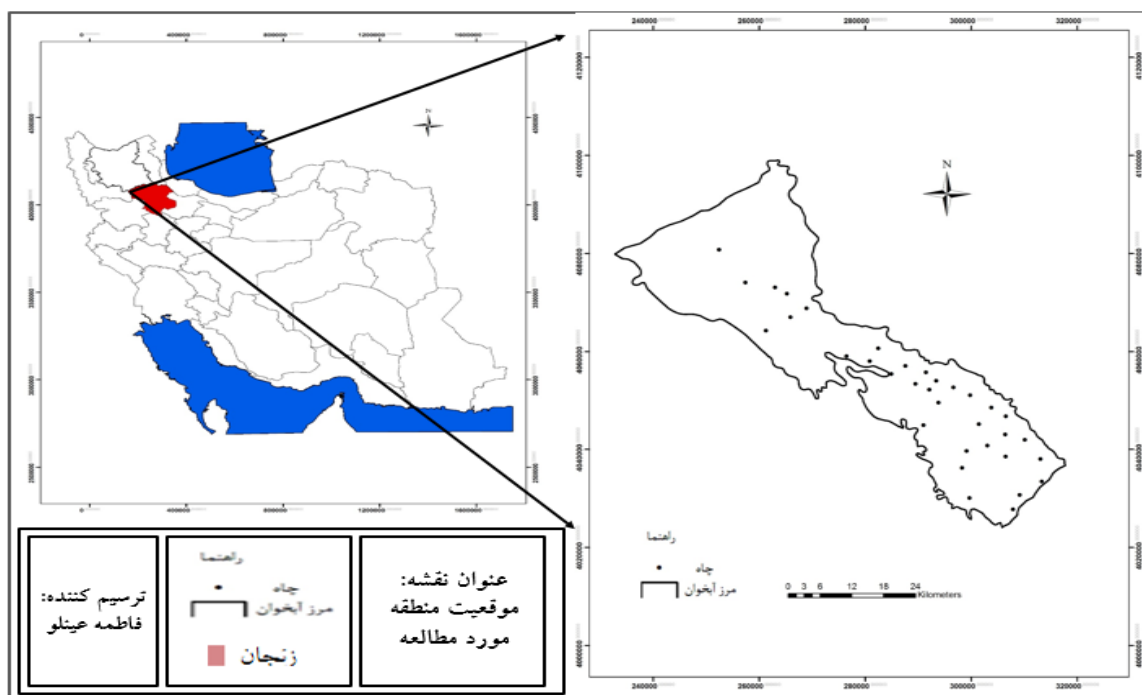
زیرزمینی مانند EC^۱، SAR^۱ و B و Cl و همچنین بررسی روند شوری آب زیرزمینی در یک دوره پنج‌ساله با استفاده از نمونه‌های تعداد ۳۸ حلقه چاه از روش درون‌یابی کریجینگ استفاده کردند. اوسطی و همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از نمونه‌های آب زیرزمینی ۵۲ حلقه چاه، تغییرات مکانی میزان نیترات را در آب‌های زیرزمینی منطقه کردن بررسی کردند و با مقایسه 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 مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آماري 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

منطقه مورد مطالعه

دشت زنجان در شمال غرب ایران و شرق رودخانه 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 حوزه 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

¹-Sodium Absorption Ratio



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و محل چاه‌ها

اول و دوم است که به صورت هورست^۱، در دوران سوم بالا آمده است (تماب، ۱۳۷۰).

روش زمین‌آمار

در بررسی‌های آمار کلاسیک، نمونه‌های به دست آمده از جامعه، عمدتاً به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شوند و مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص، هیچ گونه اطلاعاتی درباره مقدار همان کمیت در نمونه دیگر و به فاصله معلوم نخواهد داشت. در صورتی که در زمین‌آمار، بین مقادیر یک کمیت در جامعه، نمونه‌ها، فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه‌ها نسبت به هم ارتباط برقرار می‌شود. همچنین در آمار کلاسیک، فرض می‌شود که تغییرپذیری یک متغیر تصادفی است. در صورتی که در زمین‌آمار،

از کل مساحت دشت، ۱۲۰۰ کیلومترمربع آن مساحت آبخوان و معادل ۷۱/۹ درصد کل مساحت دشت و ۲۵/۵ درصد کل حوضه مطالعاتی است. رودخانه 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 سالانه منطقه 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

^۱ - Horst

تحلیل‌های بسیاری را بر روی آن می‌توان به عمل آورد که از جمله آنها می‌توان به برآورد متغیر مورد نظر در نقاط بدون آمار و طراحی نمونه‌برداری اشاره کرد. تخمین زمین‌آماري شامل دو مرحله است: در مرحله اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که با آنالیز نیم تغییرنا قابل بررسی است. مرحله دوم تخمین متغیر موردنظر و به مرحله اول وابسته است. لازم به ذکر است، شرط استفاده از روش‌های زمین‌آماري، این است که داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک باشند.

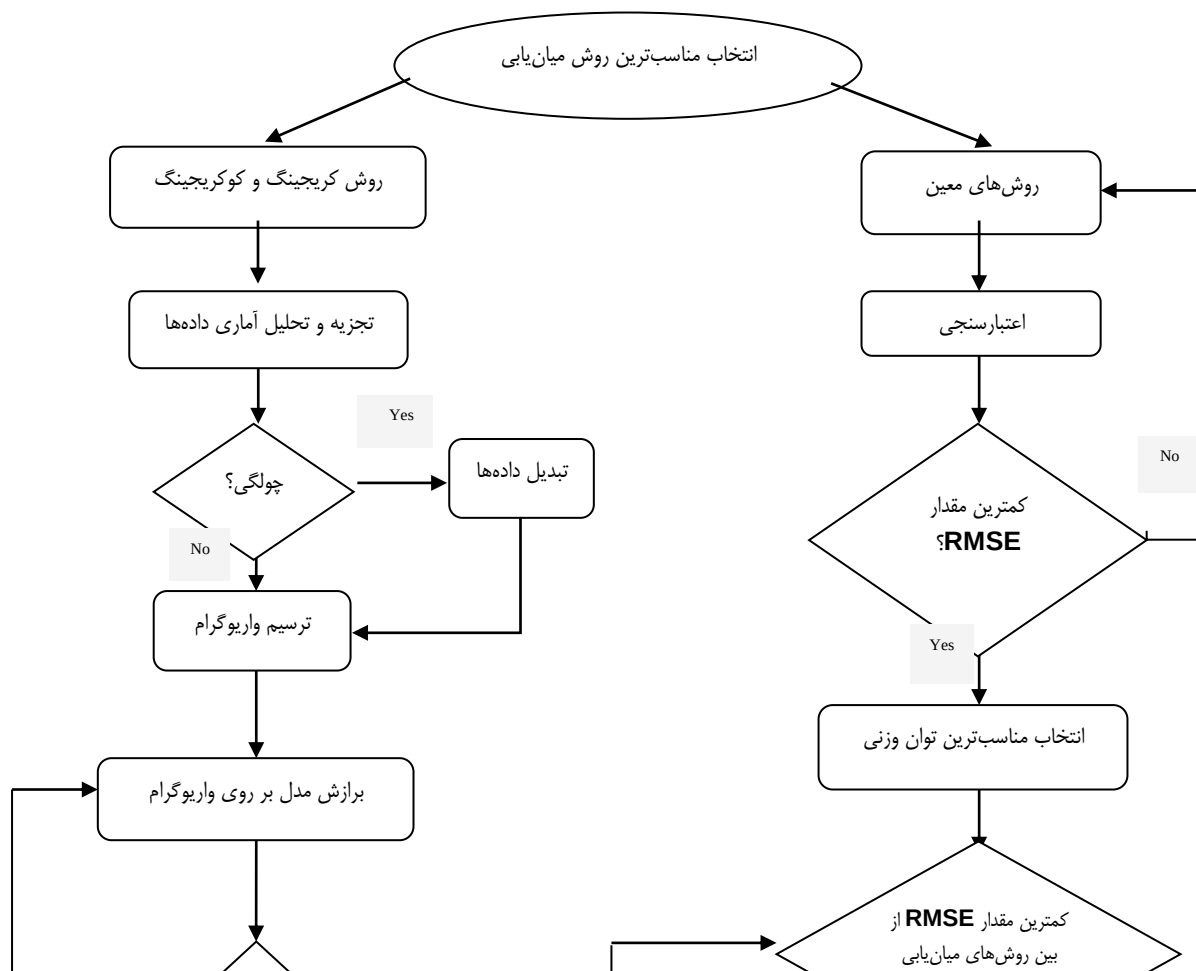
ارزیابی صحت

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

بخشی از آن تصادفی و بخش دیگر آن دارای ساختار و تابع فاصله و جهت است. بنابراین در زمین‌آمار ابتدا به بررسی وجود یا نبود 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 «نظریه متغیرهای ناحیه‌ای» است. هر متغیری که در فضای سه‌بعدی توزیع شده باشد و دارای وابستگی مکانی باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شود و در مطالعات زمین‌آماري بحث و بررسی می‌گردد. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه، به دو مؤلفه قطعی و تصادفی تجزیه می‌شود، بنابراین می‌توان نوشت:

$$Z(x) = m(x) + L(x) \quad (1)$$

که در آن: $Z(x)$: متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای به مختصات (x) ، $m(x)$: مؤلفه قطعی متغیر ناحیه‌ای، $L(x)$: مؤلفه تصادفی متغیر ناحیه‌ای است. در صورتی که متغیر ناحیه‌ای دارای ساختار مکانی مناسبی باشد،



شکل ۲- روند اجرایی مطالعات زمین آماری و انتخاب بهترین مدل و روش میان یابی برای متغیر

بررسی تغییرات مکانی داده ها

هر متغیر تصادفی را می توان به صورت دو مؤلفه قطعی و تصادفی در نظر گرفت. به منظور تعیین میزان ارتباط مکانی یک متغیر تصادفی در زمین آمار از نیم تغییرنما استفاده می شود. نیم تغییرنما کمیتی برداری است که میزان ارتباط مکانی بین نقاط اندازه گیری شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و در نظر گرفتن فاصله و جهت آنها نشان می دهد. یک نیم تغییرنما، با استفاده از مقادیر معلوم مقادیر مجهول را برآورد می کند. فرم محاسباتی یک نیم تغییرنما به صورت رابطه (۱) است:

رابطه (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) ، مقدار اندازه گیری شده متغیر در مکان $(x_i + h)$ ، $Z(x_i)$: مقدار اندازه گیری شده متغیر در مکان x_i ، n : تعداد اندازه گیری های انجام شده در محدوده مورد مطالعه است (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

در این پژوهش، پس از دریافت آمار از شرکت مدیریت منابع آب ایران، برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای TDS، TH، pH و EC، تعداد ۳۴ حلقه چاه از سطح دشت که نماینده منطقه مورد مطالعه بودند، انتخاب شدند (شکل ۱). سپس روش های مختلف درون یابی با هم مقایسه شدند و بهترین روش انتخاب شد. در نهایت، بر اساس آن نقشه پهنه بندی کیفیت آب زیرزمینی تهیه شد.

روش های مختلف درون یابی

روش توابع شعاعی^۴ (RBF): 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. R نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین هر جفت نقطه در مجموعه 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 تخمین گر خطی نااریب است. در صورتی که $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان (x_i) ، Z_0 مقدار تخمین زده شده متغیر در نقطه (x_0) از ترکیب خطی رابطه (۳) است:

رابطه (۳)

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

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 تخمین گر نرمال بودن متغیر است (الیاس‌آذر، ۱۳۸۱).

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

روش عکس فاصله (IDW^1): در این روش مقدار فاکتور وزنی (λ_i) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

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

که در آن، D_i = فاصله بین نقطه برآورد شده و مقدار مشاهده شده در نقطه i ؛ a : تعداد نقاط مشاهده شده است. این روش دارای توان‌های مختلف است که در این پژوهش، توان ۱ تا ۴ و توان دارای کمترین خطا استفاده شد.

روش تخمین گر موضعی (GPI^2): این روش یک مدل رگرسیونی چندمتغیره بر اساس تمامی داده‌ها و یک سطح تفهیمی ایجاد و مدلی را بر نقاط نمونه برداری 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 تخمین گر عام (LPI^3): 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 می‌کند و مقادیر سطحی در مرکز هر پنجره در هر نقطه به وسیله برازش یک چندضلعی تخمین زده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به روش تخمین گر موضعی دارد. این دو روش هیچ فرضی برای داده‌ها نیاز ندارند.

^۱ - Inverse Distance Weighting

^۲ - Global Polynomial Interpolation

^۳ - Local Polynomial Interpolation

^۴ - Radial Basis Function

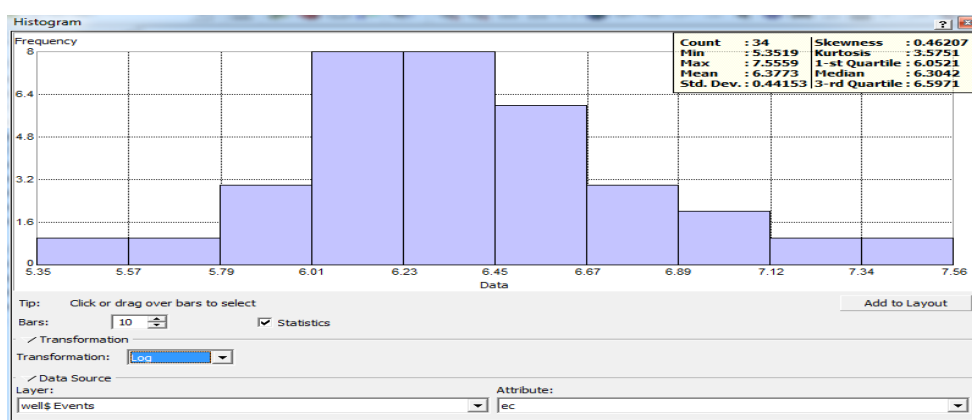
^۵ - Kriging

نتایج و بحث

استفاده از روش‌های زمین‌آماري مستلزم بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌هاست که با آنالیز واریوگرام این امر بررسی می‌شود و شرط استفاده از این آنالیز، نرمال بودن 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 جامعه 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	میان
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



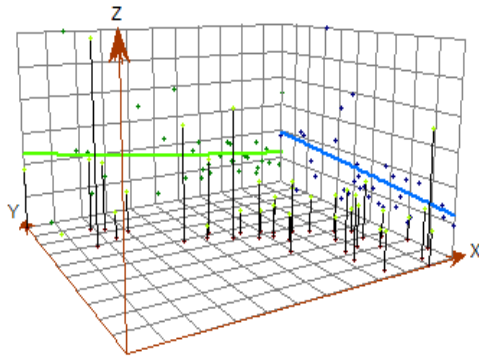
شکل ۳- هیستوگرام نرمال‌شده داده‌های مربوط به EC

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

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

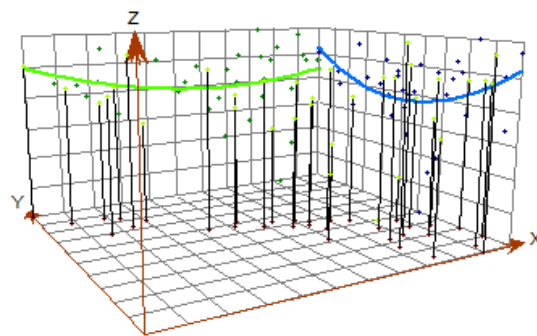
که در آن: $\hat{Z}(x_i)$: مقدار برآوردشده در نقطه x_i , مقدار اندازه‌گیری‌شده در نقطه x_i , i : شماره نقاط و n : تعداد نقاط مشاهده‌شده است. در این روش در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای کلیه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌گردد و در پایان به ازای هر نقطه مشاهده‌ای یک نقطه برای برآورد وجود خواهد داشت.

های ممکن از مقادیر سمی واریوگرام، تعیین موقعیت پارامتر و توزیع نقاط زوج با فاصله کم و تغییرات بالا و توزیع نقاط زوج با فاصله زیاد و تغییرات بالاست (برای نمونه شکل‌های ۶ و ۷).

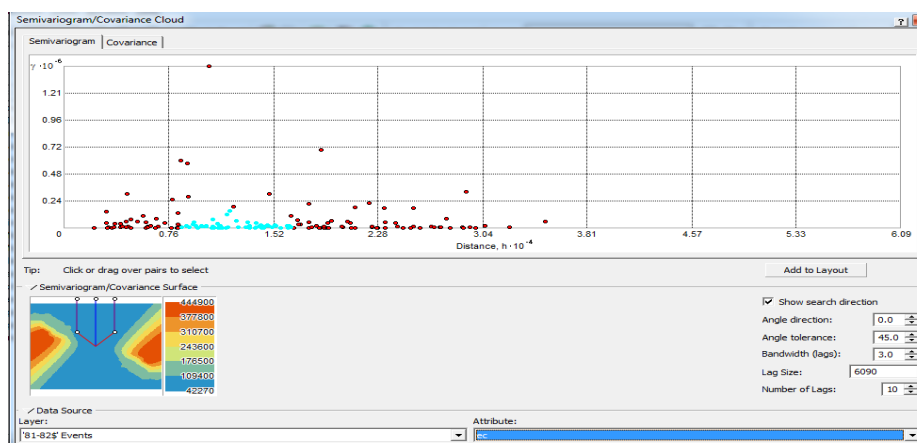


شکل ۴- روند تغییرات مکانی غلظت TH، EC و TDS از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی-جنوبی (خط با شیب افزایشی)

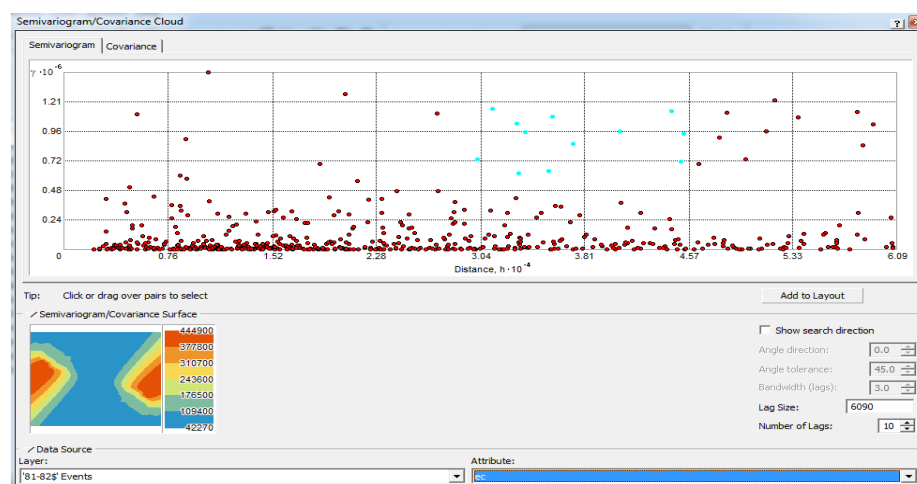
بررسی روند تغییرات مکانی در دشت مورد مطالعه نشان می‌دهد، غلظت EC، TDS و TH از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی-جنوبی نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد که با نقشه‌های استخراجی مطابقت دارد (شکل ۴). روند تغییرات مکانی pH در دشت زنجان نشان می‌دهد، مقدار آن از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی-جنوبی دارای منحنی تغییرات U شکل است که با نقشه‌های استخراجی مطابقت دارد (شکل ۵). مقادیر سمی واریوگرام ترسیم شده نشان‌دهنده 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 مکانی بودن تغییرات است؛ یعنی با افزایش فاصله نقاط اختلاف داده‌ها افزایش یابد و در شعاع تأثیر مشخصی واریانس داده‌ها ثابت شود. از دیگر تحلیل‌ها-



شکل ۵- روند تغییرات مکانی غلظت PH از غرب به شرق دشت و در راستای شمالی-جنوبی دارای منحنی تغییرات U شکل



شکل ۶- مقادیر سمی واریوگرام پارامتر EC از مرکز به شمال دشت و توزیع نقاط زوج با فاصله کم و تغییرات بالا



شکل ۷- مقادیر سمی واریوگرام پارامتر EC و توزیع نقاط زوج با فاصله زیاد و تغییرات بالا

تهیه نقشه توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب
زیرزمینی از این روش‌ها استفاده شد (جدول ۲).

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

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

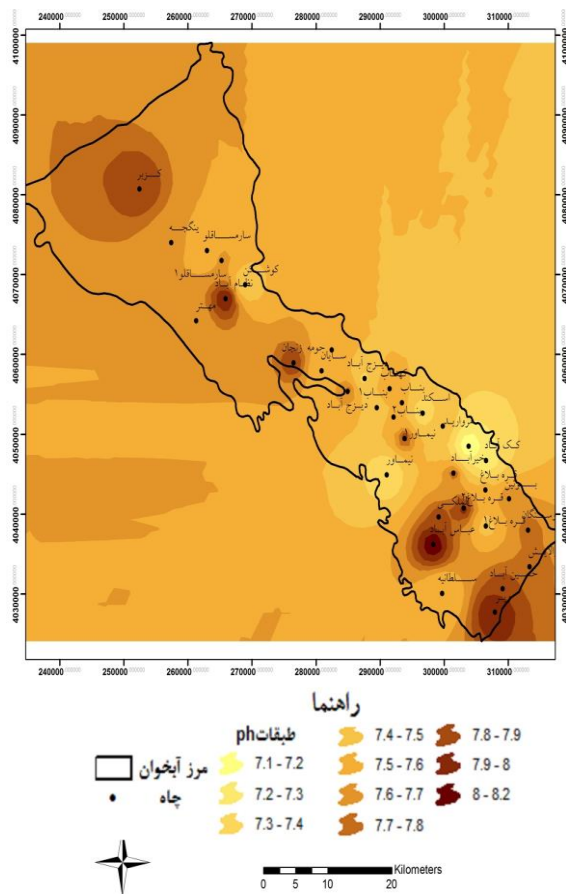
مناسب‌ترین روش میان‌یابی

برای تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی در بین روش‌های زمین‌آمار از مجذور میانگین مربعات خطا^۱ استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای TDS و TH با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی و تابع کرنل^۲ 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

۱- RMSE

۲- Inverse Multi quadric

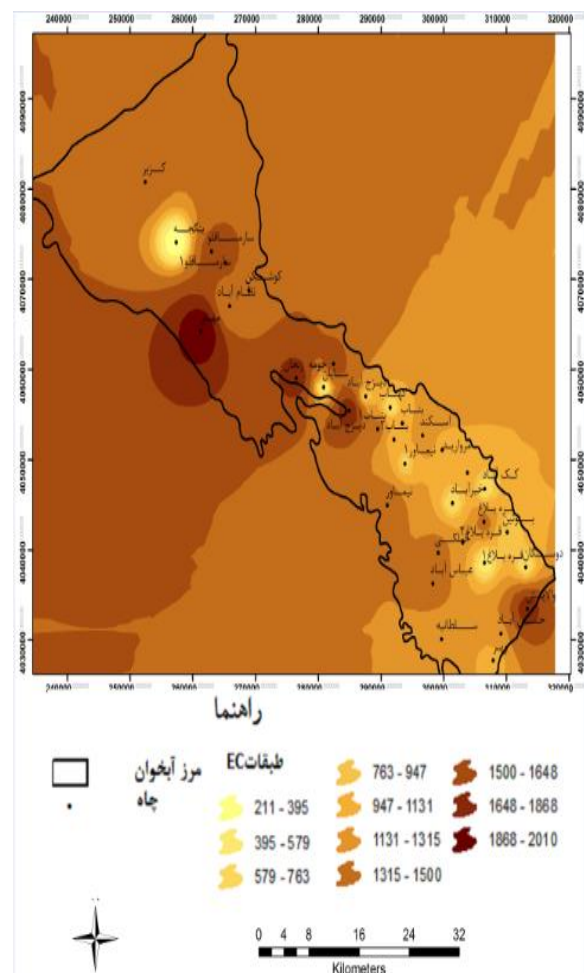
۲- پارامتر pH: با توجه به استانداردهای آب شرب که حداکثر مطلوب این پارامتر را بین $7 < pH < 8.5$ تعریف کرده‌اند (مهدوی، ۱۳۸۶) و با توجه به شکل ۹ که پهنه‌بندی آب زیرزمینی را در دشت زنجان نشان می‌دهد، هیچ محدودیتی به لحاظ شرب در این دشت وجود ندارد. از مرکز دشت به طرف جنوب شرق و شمال غرب، pH در حال افزایش و بقیه قسمت‌ها در حال کاهش است.



شکل ۹- پهنه‌بندی پارامتر pH با استفاده از روش IDW

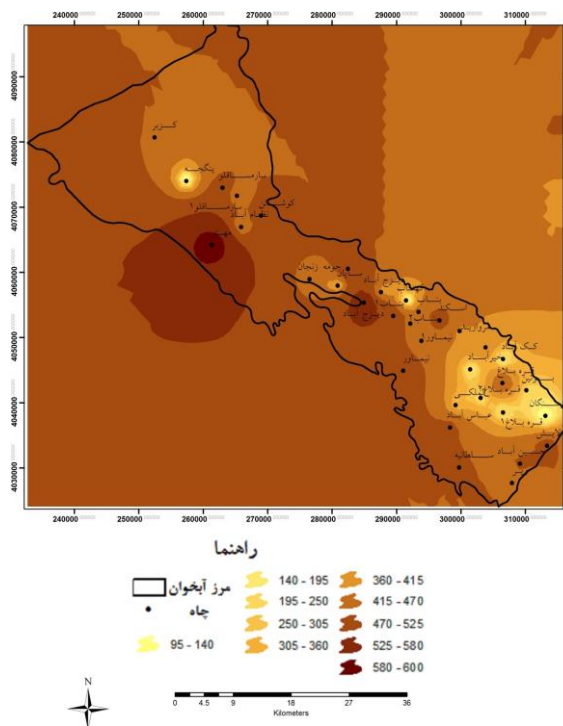
۳- پارامتر TDS: با توجه به استانداردهای آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی، استاندارد اروپایی

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 بقیه 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

۴- پارامتر TH: به توصیه سازمان بهداشت جهانی (W.H.O) سختی آب شرب نباید از ۵۰۰ میلی گرم 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 میلی گرم 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 کلیه چاه‌ها در طبقه سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی می‌شوند.

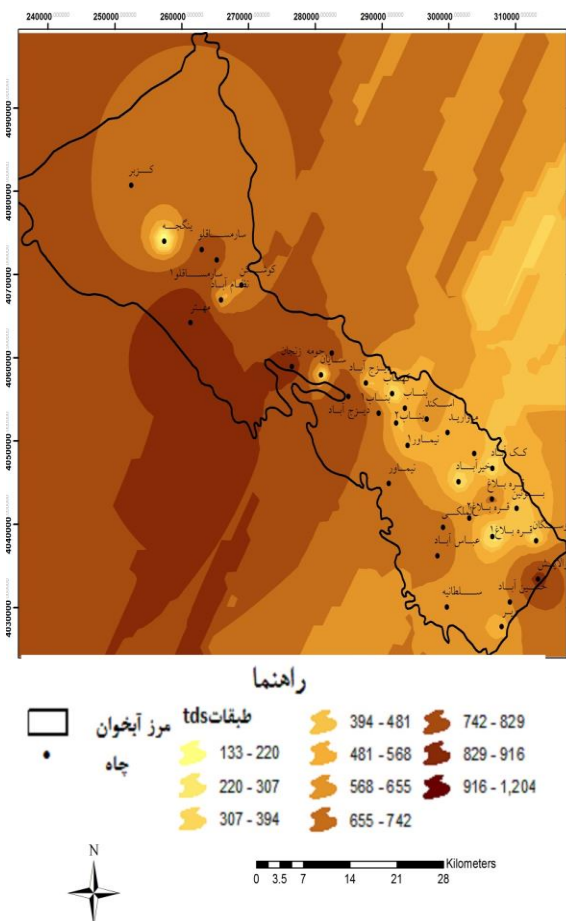


شکل ۱۱- پهنه‌بندی پارامتر TH با استفاده از روش RBF

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد

۱۹۷۰ و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا ۱۹۷۵ مقدار توصیه شده باقی مانده خشک برای آب شرب ۵۰۰ میلی گرم 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 به دلیل خالی بودن این مناطق از سکنه، مقادیر باقی مانده خشک به مرور در حال کاهش است. در شمال غرب و جنوب غربی دشت مقادیر باقی مانده 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

که روش‌های زمین‌آماري توانايي قابل ملاحظه‌اي در تحليل مكاني خصوصيات آب زيرزميني و پهنه‌بندي كيفيت آن دارند. نبود اطلاعات معتبر در كيفيت آب زيرزميني معمولاً براي پايش كيفي منابع آب زيرزميني محدوديتي جدي است. توسعه سامانه اطلاعات مكاني^۱ در برنامه‌هاي مختلف آب شرب امري ضروري است. نمونه‌برداري از آب شرب و پايش آن بايد در طراحي برنامه‌ها، اجرا و ارزيابي به‌عنوان عنصر اوليه قرار گيرد. سيستم اطلاعات مكاني بر اساس الگوي كيفيت آب زيرزميني با شناخت الگوهاي شيميايي، در تفهيم فرايندهاي ژئوشيميايي منطقه و براي مديريت سلامت عمومي استفاده مي‌شود. نتايج اين بررسي نشان مي‌دهد، مقدار EC و PH و TDS در جنوب شرقي و شمال غربی و جنوب غربی دشت زنجان بالاتر از مقدار استاندارد آب آشاميدنی سازمان بهداشت جهانی است و نشان‌دهنده تأثیرات بالای فعالیت‌های انسانی بر مقدار آنها در منطقه مورد مطالعه است؛ بنابراین آب زیرزمینی دشت از فعالیت‌های انسانی و به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی تأثیر گرفته است. بررسی دقیق روند تغییرات مكاني در دشت نشان مي‌دهد، در مناطق كم‌شيب با كاريبري كشاورزي بيشترين مقادير TDS و EC مشاهده شده است. مقادير سمی و اريوگرام ترسيم شده نشان‌دهنده مكاني بودن تغييرات بودند. از تحليل سمی و اريوگرام چنين استنباط مي‌شود كه نقاط زوج با فاصله كم و تغييرات بالا در بخش كم‌شيب دشت هستند كه با کاهش شيب توجيه مي‌شود؛ يعني آب فرصت بيشتری برای نفوذ خواهد داشت و بر اين اساس افزايش مقدار پارامترها را

داريم. توزيع نقاط زوج با فاصله زياد و تغييرات بالا نشان‌دهنده بالابودن مقادير TDS و EC در كاريبري كشاورزي و اختلاف قابل توجه مقادير اين پارامترها در آب زيرزميني اين مناطق نسبت به كاريبري‌هاي روستايي است. در اين پژوهش، روش‌هاي زمين‌آماري عكس فاصله (IDW) با توان (۱ تا ۴)، توابع شعاعي (RBF) (با پنج تابع كرnl)، تخمين گر موضعي (GPI) با توان (۱ تا ۳)، تخمين گر عام (LPI) با توان (۱ تا ۳) و روش كريجينگ معمولي (مدل‌هاي كروي، گوسي، نمایی) در نرم‌افزار Arc GIS ارزيابي شد. نتايج نشان داد، پارامترهاي TDS و TH با استفاده از روش تخمين گر توابع شعاعي و تابع كرnl كمترين مقدار RMSE را داشته‌اند و پارامتر EC و pH با استفاده از روش عكس فاصله كمترين مقدار RMSE را داشته است و برای تهیه نقشه توزيع مكاني پارامترهاي كيفيت آب زيرزميني از اين روش‌ها استفاده شد.

نتايج اين پژوهش، بجز با نتايج پژوهش عسكري و همكاران (۱۳۸۸)، كه روش RBF را بهترين روش معرفي مي‌كند با هيچ‌كدام از پژوهش‌هاي انجام گرفته تا كنون كه بيشتر روش كريجينگ را بهترين روش برای پهنه‌بندي معرفي مي‌كنند، تطابق ندارد و روش‌هاي تخمين گر توابع شعاعي برای TDS و TH و روش عكس فاصله برای EC و pH را با توجه به مجذور ميانگين مربعات خطا، بهترين روش‌ها برای پهنه‌بندي كيفيت آب زيرزميني در دشت زنجان معرفي مي‌كند. البته در بيشتر مطالعات قبلي برای پهنه‌بندي كيفيت آب زيرزميني، فقط روش‌هاي كريجينگ و كوكريجينگ را با هم مقايسه کرده‌اند كه همين روش پژوهش (مقايسه كريجينگ و كوكريجينگ) در انتخاب كريجينگ به‌عنوان بهترين روش ميانيابي بی‌تأثير نبوده

^۱ - GIS

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

مقدار پارامتر EC برای آب شرب مورد استفاده 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 بقیه 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 $7 < pH < 8.5$ تعریف کرده‌اند، پارامتر pH در کل منطقه به لحاظ 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 نقشه پهنه‌بندی پارامتر مورد نظر، نشان می‌دهد که از مرکز دشت به سمت شمال شرقی به دلیل 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 توصیه سازمان بهداشت جهانی (W.H.O) و بر اساس نقشه 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 کلیه چاه‌ها در طبقه سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی می‌شوند.

منابع

- حسینی‌پاک، 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 و آب)، انتشارات جهاد دانشگاهی، صفحه ۳۰۰.
- صاحب‌جلال احسان، فرهاد، دهقانی، منیرالسادات طباطبایی‌زاده، (۱۳۹۲). تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ (مطالعه موردی: دشت بهادران مهریز)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۶۵: ۶۱-۵۱.
- رستمی‌خلج، محمد، محسن، محسنی‌ساروی، رشید،

- 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.
- افشارنیا، دانا، حسامی، (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، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان.
- اوسطی، خالد، علی، سلاجقه، صالح، آرخی، (۱۳۹۱). تغییرات مکانی میزان نیترات در آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار (مطالعه موردی دشت کردان)، نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۵، شماره ۴، شماره ص ۴۶۱-۴۷۲.
- شعبانی، محمد، (۱۳۸۷). تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارسنجان)، مجله مهندسی آب، ص ۴۷-۵۸.
- 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^+ (مطالعه موردی: دشت زرنده)، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
- عسکری، معصومه، ابوالفضل، مساعدی، امیراحمد، دهقانی، مهدی، مفتاح‌هلقی، (۱۳۸۸). بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی به وسیله تحلیل‌های زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه 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. Geostatistical 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.