مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷
ص ۲۴۰-۲۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۷
تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۰۵/۱۳

پهنه‌بندی و مقایسهٔ ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت چاه‌های آب آشامیدنی در محدودهٔ شهر یزد با کاربرد زمین‌آمار

❖ **فرزانه فتوحی فیروزآباد*؛** دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه یزد

❖ **محمدرضا اختصاصی؛** استاد دانشکدهٔ منابع‌طبیعی، دانشگاه یزد

❖ **محمد سفید؛** دانشیار دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه یزد

❖ **علی مروتی شریف آبادی؛** استادیار دانشکدهٔ مدیریت صنعتی، دانشگاه یزد

چکیده

پهنه‌بندی کیفی منابع آب آشامیدنی یکی از ضرورت‌های مدیریت این مادهٔ حیاتی در مناطق خشک و فراخشک می‌باشد. در این پژوهش تغییرات مکانی ۱۱ شاخص یا ویژگی کیفیت آب (هدایت الکتریکی، سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، نیترات، سولفات، قلیائیت، کلر، سختی کل و کل مواد جامد محلول) ۵۵ حلقه چاه عمیق آب آشامیدنی واقع در دشت یزد مربوط به سال ۱۳۹۴ مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی و انتخاب بهترین روش درون‌یابی از روش‌های کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، عکس مجذور فاصله و شاخص آماری RMSE استفاده گردید. نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده نشان داد که آب‌های زیرزمینی منطقهٔ یزدگرد و چرخاب که به ترتیب در دو بخش جنوب شرقی و شمال غربی محدودهٔ مطالعاتی واقعند و متأثر از جریانات رودخانه‌های مهریز و تفت می‌باشند، از کیفیت مطلوبتری نسبت به چاه‌های بخش میانی برخوردار می‌باشند. دامنهٔ تغییرات شاخص‌های اصلی کیفیت از جمله TDS از کمتر از ۵۰۰ تا بیش از ۲۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و شاخص EC از کمتر از ۷۰۰ تا بیش از ۳۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است که این دستاورد بیانگر ضرورت مدیریت حساس بهره‌برداری و آماده‌سازی آب با کیفیت جهت ورود به شبکه آشامیدنی می‌باشد. ضمناً چاه‌های بخش میانی از جمله چاه‌های ۱۶ سیلو، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو از لحاظ پارامترهای کیفی TDS، TH، EC و Cl بیش از دو برابر حد مجاز استاندارد ملی می‌باشد که پیشنهاد می‌گردد نسبت به حذف و یا تعدیل بهره‌برداری از آن‌ها در شبکهٔ آب آشامیدنی یزد اقدام لازم اعمال گردد.

کلید واژگان: پهنه‌بندی، درون‌یابی، زمین آمار، کریجینگ، کیفیت آب آشامیدنی، GIS.

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۰۹۸۹۱۳۲۵۹۵۰۳۹+
Email: farzaneh.fotouhi@gmail.com

۱. مقدمه

تغییر کیفیت آب زیرزمینی و شور شدن منابع آب هم‌اکنون خطری بزرگ در راه تأمین و توزیع آب آشامیدنی کشور به‌ویژه در اراضی خشک می‌باشد. تهیه نقشه‌های به‌هنگام تغییرات شوری و املاح می‌تواند گامی مهم در بهره‌برداری صحیح از منابع آب باشد. علاوه بر آن، بررسی تغییرات ویژگی‌های شیمیایی آب زیرزمینی نقش بسزایی در مدیریت استفاده و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند.

اولین قدم در تعیین کیفیت آب با استفاده از زمین‌آمار انتخاب یک مدل مناسب جهت میان‌یابی و پهنه‌بندی داده‌ها است. پژوهش‌های زیادی در ارتباط با تحلیل‌های فضایی، روش‌های میان‌یابی و پهنه‌بندی توسط محققان انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات لاستت و همکاران [۲۲]، کرسیس [۲۰]، وب و انگلند [۴۱]، هاچینسون [۱۷] اشاره نمود. نتایج این پژوهش‌ها نشان‌دهندهٔ دقت بالای روش‌های کریجینگ برای میان‌یابی است. قهرمان و همکاران [۱۲] در تحقیق خود تحت عنوان کاربرد زمین آمار در ارزیابی شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی به این نتیجه رسیدند که مناسب‌ترین مدل واریوگرام برای نیترات، مدل نمایی و برای هدایت الکتریکی مدل خطی سقف‌دار می‌باشد و نیز نقشه‌های توزیع مقادیر و خطای تخمین این عامل‌های کیفی به روش کریجینگ ترسیم شد. گالیچاند و همکاران [۱۱] در تحقیقی روش‌های مختلفی را برای میان‌یابی شوری و قلیاییت خاک بررسی کرده و نشان دادند که روش کریجینگ روشی مناسب برای میان‌یابی است. تعیین یک روش مناسب جهت میان‌یابی و پهنه‌بندی داده‌ها نیاز به حجم زیادی از داده‌های کیفی و جغرافیایی دارد. در این بین سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با ظرفیت ذخیره، سازمان‌دهی، آنالیز، بازیابی، نمایش و تهیهٔ خروجی‌های مناسب، به‌عنوان ابزار مناسبی است که می‌تواند محققین را در دستیابی به روش مناسب میان‌یابی و فهم شرایط هیدرولیکی و محیطی کمک نماید[۲۹، ۱ و ۳۳]. تقی زاده مهرجردی و همکاران[۴۰] در مطالعهٔ دشت یزد- اردکان به تحلیل مکانی برخی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی مانند TDS، TH، EC، SAR و SO4 با استفاده از سه روش IDW، کریجینگ و کوکریجینگ پرداختند. ارزیابی نتایج حاصله بر پایهٔ RMSE نشان داد که روش کریجینگ بر دو روش دیگر برتری داشته و در نهایت به‌عنوان روش نهایی و مناسب برای تهیهٔ نقشهٔ ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی در منطقه انتخاب گردید. بارکا و پاسارلا [۴] برای تهیهٔ نقشهٔ خطرات نیترات در دشت مادنا در ایتالیا از روش کریجینگ گسسته و روش‌های شبیه‌سازی استفاده کردند. نتایج نشان داد روش کریجینگ گسسته برای مطالعهٔ خطر تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی مناسب است. شیخ گودرزی و همکاران [۳۷] برای شبیه‌سازی تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت تهران- کج با تأکید بر مصارف آشامیدنی، از روش‌های زمین آماری استفاده نمودند. نظری زاده و همکاران [۲۷] از روش‌های زمین آماری کریجینگ معمولی برای بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بالارود واقع در استان خوزستان استفاده کردند و گزارش نمودند که نیم‌تغییرنمای قابلیت هدایت الکتریکی، کلر و سولفات از مدل‌های کروی به‌ترتیب با دامنهٔ تأثیر ۶۱۷۰۰، ۵۰۸۰۰ و ۱۰۲۱۰۰ متر و حدود آستانه ۰/۵۳، ۱/۵۳ و ۲/۰۵ تبعیت می‌نمایند. محمدی و همکاران [۲۵] نیم‌تغییرنمای کروی با مقادیر اثر قطعه‌ای ۴۱ و ۹۳ و شعاع تأثیر ۱۰۰ و ۹۶ کیلومتر به‌ترتیب برای روش‌های کریجینگ معمولی و کوکریجینگ معمولی نقطه‌ای را در پهنه‌بندی کل املاح محلول آب ۵۰ حلقه چاه دشت قزوین مناسب‌تر از سایر روش‌ها معرفی نمودند. ثمین و همکاران [۳۴] نیز از روش کریجینگ و کوکریجینگ معمولی برای تخمین نسبت جذب سدیم و کلر در آب‌های زیرزمینی ۹۰ حلقه چاه استان فارس استفاده کردند و بیان نمودند هر دو روش تخمین‌های قابل قبولی ارائه نمودند اما تخمین

نسبت جذب سدیم و کلر با استفاده از روش کوکریجینگ و شوری آب دقیق‌تر از روش کریجینگ بود. آنان بیان کردند نیم‌تغییرنمای مربوط به نسبت جذب سدیم و کلر از مدل‌های گوسی به‌ترتیب با اثر قطعه‌ای ۰/۲۴ و ۰/۳۷، حد آستانه ۰/۹۸ و ۱/۹۸ و دامنهٔ تأثیر ۴۷۶۰۰ و ۴۹۱۰۰ متر تبعیت نمود. ناس [۲۶] نیز با بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی ۱۵۶ چاه موجود در شهر کونیا واقع در آنتالیای ترکیه (نمونه‌برداری شده در سال ۲۰۰۳) گزارش کردند که نیم‌تغییرنمای پهاش، قابلیت هدایت الکتریکی، کلر، سولفات و سختی آب به ترتیب از مدل‌های حلقوی، درجهٔ دوم، کروی و پایدار تبعیت نمودند. ایشان بیان کردند در بین متغیرهای مورد بررسی روند مکانی کلی وجود نداشته و تنها پهاش از توزیع نرمال تبعیت نمود و سایر ویژگی‌ها با اعمال تبدیل به توزیع نرمال تبدیل شدند. دیندارلو و همکاران[۸] نشان دادند که میزان فلوئور، سولفات، کلرور، سدیم، سختی کل، هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول در منابع آب زیرزمینی شهر بندرعباس از حداکثر مجاز و میزان نیتریت و کلسیم نیز از حد مطلوب فراتر است. در پژوهشی به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی خطر نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت مادنا در ایتالیا نیز از روش‌های زمین آماری و شبیه‌سازی استفاده و گزارش شد نیم‌تغییرنمای غلظت نیترات از مدل نمایی با دامنهٔ تأثیر حدود ۱۶۰۰۰ متر تبعیت می‌نماید و روش کریجینگ گسسته برای مطالعهٔ تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی و تخمین غلظت نیترات مناسب است[۴].

دش و همکاران [۷] تغییرات مکانی ویژگی‌های شیمیایی کیفیت آب زیرزمینی (شامل میزان کلر، قابلیت هدایت الکتریکی، فلوئور، منیزیم و نیترات) را در دهلی هند بررسی و بیان کردند که نیم‌تغییرنمای این ویژگی‌ها از مدل کروی تبعیت نمود. آنان برای تخمین و تحلیل تغییرات مکانی از روش کریجینگ معمولی و برای پهنه‌بندی و تهیهٔ نقشهٔ ویژگی‌های مورد مطالعه از روش کریجینگ شاخص استفاده نمودند. تقی زاده مهرجردی و همکاران [۳۹] نیز گزارش نمودند که روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی کل املاح محلول، سدیم، شوری، نسبت جذب سدیم و یون‌های کلر و سولفات آب ۶۵ چاه دشت رفسنجان بر روش وزن‌دهی عکس فاصله برتری دارند.

همانند برخی دیگر از محققان، کرسیک [۲۰] نشان داد که روش کریجینگ معمولی در بین سایر روش‌های زمین آماری قادر به شبیه‌سازی مناسبی از ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی می‌باشد. یاماموتو [۴۳] نیز گزارش کردند که روش کریجینگ معمولی در میان سایر انواع کریجینگ (کریجینگ ساده، کریجینگ عام، کریجینگ گسسته، کریجینگ بلوکی و کوکریجینگ) برای تخمین روش قابل اعتمادتر و مناسب‌تری در مقایسه با سایر انواع کریجینگ می‌باشند. در حالی که استواری و همکاران [۳۰] پس از بررسی تغییرات مکانی- زمانی غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی ۳۲ حلقه چاه موجود در دشت لردگان شهرکرد گزارش کردند که نیم‌تغییرنمای غلظت نیترات از مدل کروی تبعیت نموده و روش وزن‌دهی معکوس فاصله نسبت به کریجینگ معمولی روش مناسب‌تری برای تخمین غلظت نیترات می‌باشد. در پژوهش دیگری ویدوری و همکاران [۴۲] نیز تغییرات زمانی نیترات در آب‌های زیرزمینی در ۲۷ چاه واقع در منطقهٔ هتوای چین در دامنهٔ سال‌های ۲۰۰۸- ۲۰۰۳ را بررسی کردند و روش وزن‌دهی معکوس فاصله را روش مناسب برای تخمین غلظت نیترات پیشنهاد کردند. شعبانی [۳۵] نیز روش‌های زمین آماری کریجینگ معمولی و ساده را به‌ترتیب روش مناسب برای پهنه‌بندی و تهیهٔ نقشهٔ تغییرات پهاش و غلظت نمک‌های محلول در آب زیرزمینی ۸۳ حلقه دشت ارسنجان گزارش کرده است. موقیر و همکاران [۲۴] از تئوری آنتروپی برای بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی (غلظت کلر) در چاه‌های نوار غزه استفاده نمودند و بیان کردند که تغییرات مکانی غلظت کلر با تغییر فاصله از مدل نمایی تبعیت می‌نماید. بررسی منابع و تحقیقات انجام شده

نشان می‌دهد محققان روش‌های گوناگونی را برای بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی در شرایط و مناطق مختلف به‌عنوان روش مناسب پیشنهاد نموده‌اند.

هدف از انجام این پژوهش بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب آشامیدنی چاه‌های شهرستان یزد با استفاده از روش‌های زمین‌آماری می‌باشد، همچنین ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری، محاسبهٔ مقدار خطا و انتخاب بهترین روش درون‌یابی برای تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی از اهداف دیگر این تحقیق می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۱،۲. منطقهٔ مورد مطالعه

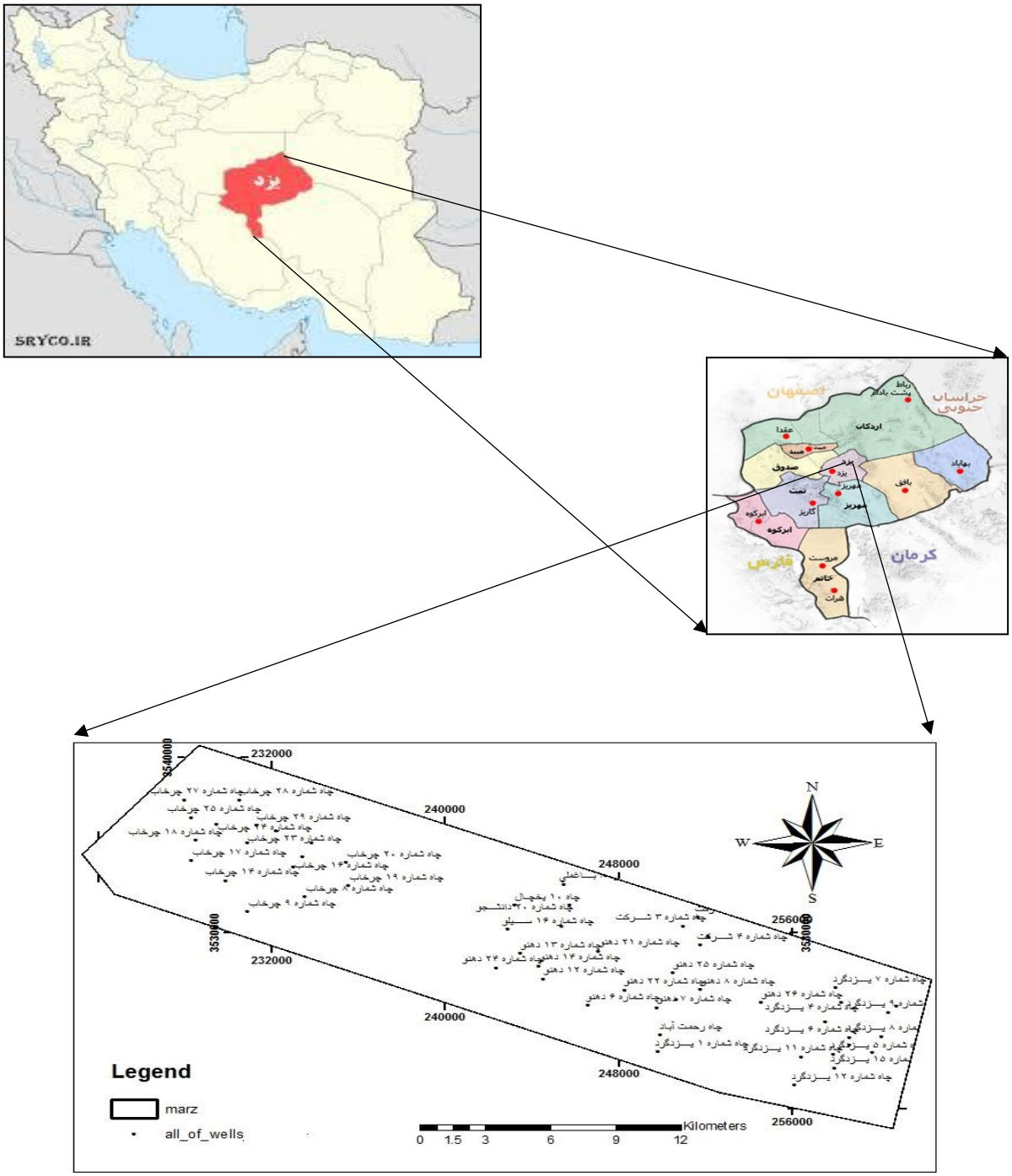
استان یزد را می‌توان خشک‌ترین استان کشور از نظر منابع آبی قلمداد نمود. مشکل اصلی استان یزد کمبود آب است. متوسط بارندگی سالیانهٔ حوزهٔ دشت یزد در حدود ۱۱۰ میلی‌متر است در حالی که این رقم در کشور ۲۵۰ میلی‌متر است. در طول سال حدود ۱/۳ میلیارد مترمکعب آب از طریق نزولات جوی به منابع آبی استان افزوده می‌شود، اما به دلیل خشک و فراخشک بودن منطقه، میزان تبخیر پتانسیل نیز به طور متوسط ۳۰۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. متوسط سالیانهٔ رطوبت نسبی و درجهٔ حرارت این شهر به‌ترتیب ۳۳ درصد و ۱۸ درجهٔ سانتی‌گراد است. سهم مصارف عمده از آب موجود در شهر یزد در سه بخش کشاورزی، صنعت و شرب به‌ترتیب ۸۹ درصد، ۴ درصد و ۷ درصد می‌باشد[۳۶]. بحران کم‌آبی در استان یزد جدی است. این استان در زمینهٔ تأمین آب به طور کلی و در بحث آب آشامیدنی به طور خاص با مشکل مواجه است و با وجود این وضعیت قطعاً در یکی دو سال آینده، استان دچار مشکل اساسی خواهد بود. با توجه به بارندگی‌های اندک استان، ورودی آب به سفره‌های زیرزمینی استان یزد یک میلیارد و ۲۰۰ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد، این در حالی است که سالانه ۱/۵ میلیارد مترمکعب آب از این سفره‌ها برداشت می‌شود و به طور مستمر با بیلان منفی مواجه است، به نحوی که شهروندان هر روز شاهد کاهش کیفیت آب آشامیدنی مصرفی می‌باشند. بسیاری از چاه‌های آب مورد استفاده استان که تا چند سال پیش آب شیرین داشته‌اند، امروز به دلیل افت شدید کیفیت (شوری بالا و آلودگی‌های بیولوژیکی و شیمیایی) از چرخهٔ بهره‌برداری خارج شده‌اند. بررسی نتایج مطالعات پارامترهای مختلف هیدرولوژی دشت یزد- اردکان نشان می‌دهد که آبخوان منطقه از نظر کمی و کیفی دارای محدودیت می‌باشد. بدین معنی که در تمامی سطح محدوده امکان تأمین آب مناسب وجود ندارد و فقط در منطقهٔ محدودی از دشت وسیع یزد- اردکان که تحت تأثیر جریانات زیرزمینی از ارتفاعات جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی قرار دارند، امکان تأمین آب با کیفیت در حد استانداردهای قابل قبول میسر است. مساحت تقریبی محدوده بالغ بر ۷۵۰ کیلومتر مربع می‌باشد که از نظر مختصات U.T.M حد غربی محدوده X=۲۲۷۰۰۰ و حد شرقی آن X =۲۶۱۰۰۰، حد شمالی در محور Y =۳۵۴۰۰۰۰ و حد جنوبی Y =۳۵۱۸۰۰۰ قرار دارد که با کسر مساحت ارتفاعات جنوب و جنوب غربی و بخشی از شمال شرق منطقه مذکور، مساحت دشتی که امکان بهره‌برداری از آن میسر است حدود ۶۰۰ کیلومترمربع می‌باشد. شکل (۱) نقشهٔ پراکنش و موقعیت چاه‌های آب آشامیدنی محدودهٔ شهر یزد را نشان می‌دهد.

۲،۲. روش تحقیق

در این تحقیق برای پهنه‌بندی کیفیت آب منطقه از نتایج نمونه‌برداری شیمیایی ۵۵ حلقه چاه که در سال ۱۳۹۴ نمونه‌برداری شده‌اند؛ استفاده شد. نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی در محیط نرم افزار ArcGIS9.3 تهیه شد. در این تحقیق برای ارزیابی و انتخاب بهترین روش درون‌یابی جهت تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب از روش‌های درون‌یابی کریجینگ ساده (با سه مدل گوسی، کروی و توانی)، کریجینگ

معمولی (با سه مدل گوسی، کروی و توانی) و روش عکس مجذور فاصله استفاده گردید. نهایتاً بهترین روش درون‌یابی برای پهنه‌بندی هر کدام از پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی با استفاده از شاخص آماری RMSE انتخاب شد.

سپس با توجه به جداول استاندارد ملی کیفیت آب آشامیدنی، نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.



شکل ۱. نقشهٔ پراکنش و موقعیت چاه‌های آب آشامیدنی منطقهٔ دشت یزد

۳،۲. تجزیه و تحلیل‌های آماری

در این مرحله برای تحلیل داده‌ها با نرم افزار SPSS,۱۶، شاخص‌های آماری نظیر میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، چولگی و ضریب تغییرات به دست آمد. به‌منظور استفاده از روش‌های درون‌یابی زمین آمار، داده‌ها باید به صورت نرمال توزیع شده باشند. جهت اثبات فرض نرمال بودن داده‌ها از آزمون غیرپارامتری کولموگروف- اسمیرنوف[1] استفاده شد. برای بررسی میزان ارتباط بین متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید.

۴،۲. تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری

آنالیز همبستگی مکانی و ابزار تحقیق در شرایط صدق فرضیات پایایی، تغییرنما[2] است. تغییرنما به بررسی و شناخت ویژگی‌های ساختاری متغیر ناحیه‌ای می‌پردازد و چگونگی تغییرات آن را بیان می‌کند. اگر تغییرنما به سقف معینی برسد و در نتیجه دامنهٔ تأثیر مشخصی داشته باشد، ساختار فضایی و شرایط صدق فرضیه ذاتی می‌تواند وجود داشته باشد. با توجه به این که محاسبهٔ نیم‌تغییرنما[3] برای همهٔ جامعه مورد مطالعه امکان‌پذیر نبود، نیم‌تغییرنما در یک فاصلهٔ تفکیک مشخص به وسیلهٔ تابع زیر تخمین زده شد [۵،۱۳].

$$\gamma(h)=\frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n(h)}\left[Z(x_i)-Z(x_i+h)\right]^2 \qquad (۱)$$

که در آن $\gamma(h)$ مقدار نیم‌تغییرنما برای جفت نقاطی با فاصلهٔ h از هم، $n(h)$ تعداد زوج نقاطی که با فاصلهٔ h از هم قرار دارند، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شدهٔ متغیر x و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهده شدهٔ متغیری با فاصلهٔ h از x می‌باشد. به ازای هر مقداری از h (فاصله)، عبارت $[Z(x+h)-Z(x)]$ دارای واریانس معینی بوده که بستگی به مختصات ندارد، بلکه تابعی از h می‌باشد [۱۶،۲۷]:

$$\{Z(x+h)-Z(x)\}=2\gamma(h)Var \qquad (۲)$$

برای بررسی دقت روش‌های درون‌یابی و انتخاب بهترین روش درون‌یابی، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین این روش‌ها تکنیک ارزیابی دو جانبه[4] می‌باشد. این تکنیک بر این اساس است که 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 می‌شود، به طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. ارزیابی اعتبار مدل و برآوردها با محاسبه آماره‌های میانگین خطا (ME)[5] و ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا (RMSE)[6] انجام شد [۴۴]:

$$ME=\sum_{i=1}^{n}\frac{Z^*(x_i)-Z(x_i)}{n} \qquad (۳)$$

$$RMSE=\left[\frac{\sum(Z^*(x_i)-Z(x_i))^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۴)$$

که در آن $Z^*(x_i)$، $Z(x_i)$ ، $\bar{X}$ و n به ترتیب مقدار برآورد شده، مقدار اندازه‌گیری شدهٔ متغیر مورد نظر، میانگین و تعداد داده‌ها می‌باشد [۱۳]. به منظور رسم و تدقیق تغییرنما از نرم افزار GS^+[7] استفاده شد. پس از آماده‌سازی داده‌ها تغییرنماهای مختلف رسم و دقت آن‌ها به صورت بصری و با استفاده از شاخص‌های آماری ME و RMSE انتخاب گردید. جهت بررسی تغییرات مکانی و تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی کیفیت آب‌های

1Kolmogorov-Smirnov
2 Variogram
3 Semi variogram
4 Cross validation
5 Mean Error
6 Root Mean Square Error
7 Geostatistics software

زیرزمینی از بین روش‌های درون‌یابی از روش کریجینگ معمولی (با مدل‌های کروی، گوسی و توانی)، کریجینگ ساده (با مدل‌های کروی، گوسی و توانی) و عکس مجذور فاصله استفاده شد و نهایتاً با استفاده از شاخص آماری ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا بهترین روش برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب انتخاب شد. نهایتاً با استفاده از اطلاعات حاصل از واریوگرام‌های ترسیم شده در محیط GS^+، نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی در محیط نرم افزار ArcGIS9.3 تهیه شد.

۳. نتایج و بحث

نتایج نرمال بودن متغیرهای مورد بررسی به روش کولموگروف- اسمیرنوف نشان داد که فقط متغیرهای پتاسیم و قلیائیت دارای توزیع نرمال بوده است. لذا به منظور نرمال‌سازی بقیه متغیرها از روش لگاریتم‌گیری استفاده شد. خلاصهٔ آماری توصیفی داده‌های مربوط به عوامل کیفیت آب در جدول(۱) آورده شده است.

جدول۱. خلاصهٔ آماری داده‌های اولیه (قبل از تبدیل) ویژگی‌های شیمیایی کیفیت آب آشامیدنی ۵۵ چاه در منطقهٔ مورد مطالعه

پارامتر	واحد	تعداد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	دامنهٔ تغییرات	درصد ضریب تغییرات
سختی کل(TH)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۹۵۰	۱۳۵	۲۸۹/۱	۱۶۲/۴	۲/۳	۸۱۵	۵۶/۲
کلسیم (Ca)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۱۴۵	۲۲	۵۷/۸	۳۰/۳	۱/۴	۱۲۳	۵۲/۴
منیزیم (Mg)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۱۴۲	۱۶	۳۴/۸	۲۳/۱	۲/۹	۱۲۶	۶۶/۴
سدیم (Na)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۴۵۸	۶۸	۱۵۲/۷	۷۸/۵	۲/۱	۳۹۰	۵۱/۴
پتاسیم (K)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۶/۶	۱/۵	۳/۴	۱/۶	۰/۶	۵/۱	۴۷/۲
نیترات (NO3)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۵۲	۲/۲	۹/۴	۷/۵	۳/۸	۴۹/۸	۷۹/۶
سولفات (SO4)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۵۸۰	۳۰	۱۳۲/۱	۱۰۰/۶	۳/۱	۵۵۰	۷۶/۲
کلر (CL)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۶۸۰	۷۵	۲۱۴/۵	۱۳۴/۳	۱/۹	۶۰۵	۶۲/۶
قلیائیت	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۲۵۰	۱۰۵	۱۶۲/۹	۴۶/۷	۰/۴	۱۴۵	۲۸/۶
کل مواد جامد محلول (TDS)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۵	۲۲۵۳	۴۳۹	۷۹۰/۸	۳۷۸/۸	۱/۹	۱۸۱۴	۴۷/۹
هدایت الکتریکی (EC)	میکروموس بر سانتی‌متر (µmoh/cm)	۵۵	۳۵۲۰	۶۷۶	۱۲۱۱/۶	۵۸۴/۷	۲/۰	۲۸۴۴	۴۸/۳

نتایج نشان می‌دهد بیشترین و کمترین مقدار انحراف معیار مربوط به هدایت الکتریکی و غلظت پتاسیم می‌باشد. در حالی که درصد ضریب تغییرات آنیون‌های نیترات و سولفات (به ترتیب ۷۹/۶ ٪ و ۷۶/۲ ٪) بیشترین

و برای قلیائیت ۲۸/۶ ٪ کمترین مقدار است. ضریب تغییرات قلیائیت کمتر از ۳۰ درصد شده است که نشان‌دهندهٔ یکنواختی نسبی مقدار پارامتر در سطح دشت است [۳]، در حالی که بقیهٔ شاخص‌ها دارای ضریب تغییرات نسبتاً بزرگ است که حاکی از تغییرات زیاد آنها در نقاط مختلف منطقه است. دامنهٔ تغییرات شاخص‌های اصلی کیفیت از جمله TDS از کمتر از ۵۰۰ تا بیش از ۲۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و شاخص EC از کمتر از ۷۰۰ تا بیش از ۳۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است که این دستاورد بیانگر ضرورت مدیریت حساس بهره‌برداری و آماده‌سازی آب با کیفیت جهت ورود به شبکهٔ آشامیدنی می‌باشد. جدول (۲) حداکثر مطلوب و مجاز مواد شیمیایی معدنی غیرسمی موجود در آب آشامیدنی را نشان می‌دهد.

جدول۲. حداکثر مطلوب و مجاز مواد شیمیایی معدنی غیر سمی موجود در آب آشامیدنی

پارامتر	واحد	استاندارد ملی	
Parameter	Unit	حداکثر مطلوب[1]	حداکثر مجاز[2]
سختی کل (TH)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۲۰۰	۵۰۰
کلسیم (Ca)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۷۵	۲۵۰
منیزیم (Mg)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۰	۱۵۰
سدیم (Na)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۲۵۰	۴۰۰
پتاسیم (K)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	*	*
نیترات (NO3)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۱۰	۴۵
سولفات (SO4)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۲۵۰	۴۰۰
کلر (CL)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۲۵۰	۴۰۰
قلیائیت	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	*	*
کل مواد جامد محلول(TDS)	میلی‌گرم بر لیتر (mg/lit)	۵۰۰	۱۵۰۰
هدایت الکتریکی (EC)	میکروموس بر سانتی‌متر (µmoh/cm)	۱۵۰۰	۲۰۰۰

*: استانداردی تعیین نشده است.

۱- حد مطلوب: مقداری است که عدم تأمین آن فقط کاهش کیفیت را به دنبال دارد و آب برای آشامیدن مناسب است.

۲- حداکثر مجاز: حداکثر مقداری از غلظت املاح در آب است که استمرار آشامیدن آن سلامتی یک انسان ۷۵ کیلوگرمی با مصرف روزانه ۲/۵ لیتر را به خطر نیندازد.

همان‌طور که در جداول (۱) و (۲) مشاهده می‌شود مقدار هدایت الکتریکی از حداکثر مجاز استانداردهای ایران فراتر رفته است. حد استاندارد (حداکثر مجاز) هدایت الکتریکی ۱۵۰۰ و حداکثر غلظت مطلوب ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. قابل ذکر است که ۵ حلقه از چاه‌های بخش میانی منطقهٔ مورد مطالعه دارای EC بیشتر از دو برابر حداکثر غلظت مطلوب می‌باشند (چاه‌های ۱۴ گسترش، ۱۶ سیلو، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو). به طور کلی کاهش ذخیرهٔ منابع آب از نظر کمی و تغییر کیفیت آب‌ها به سمت شوری باعث ناپایداری سفره‌های آب زیرزمینی گردیده است. آب برخی از چاه‌های بخش میانی منطقه از جمله چاه‌های رحمت آباد، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو دارای سختی کل بیشتر از حداکثر غلظت مطلوب می‌باشند. از نظر غلظت نیترات و سدیم تنها سه حلقه چاه در محدودهٔ مطالعاتی دچار محدودیت است که میزان غلظت نیترات در چاه ۲۴ دهنو و میزان غلظت سدیم در چاه‌های ۱۶ سیلو و ۶ یزدگرد بالاتر از میزان حداکثر مجاز می‌باشد.

مابقی چاه‌ها از این نظر مشکلی ندارند. میزان غلظت سولفات در چاه‌های ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو بیش از حداکثر مجاز می‌باشد. چاه‌های بخش میانی منطقه از جمله چاه‌های ۱۶ سیلو، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو بیش از دو برابر حداکثر مجاز مواد جامد محلول (TDS) دارند. میزان غلظت کلر در برخی از چاه‌های جنوب شرقی و شمال غربی منطقه از جمله چاه‌های ۱۶ سیلو، ۲۴ دهنو، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو، رحمت آباد و ۲۵ چرخاب بیش از حداکثر غلظت مجاز می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود غلظت عناصر EC، TH، TDS، NO3، Na، SO4 و Cl در اکثر چاه‌های آب آشامیدنی بیش از حد استاندارد ملی می‌باشد. نتایج حاصل از این بخش با نتایج دیندارلو و همکاران[۸] مطابقت دارد.

۱،۳. همبستگی داده‌های مربوط به تجزیهٔ شیمیایی چاه‌های آب آشامیدنی شهرستان یزد

به منظور تعیین میزان همبستگی داده‌های مربوط به نتایج تجزیهٔ شیمیایی چاه‌های آشامیدنی شهرستان یزد، ضرایب همبستگی آنها محاسبه گردید. جدول (۳) نتایج حاصل از ضرایب همبستگی بین متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی در محدودهٔ مطالعاتی را نشان می‌دهد.

جدول۳. ضرایب همبستگی داده‌های مربوط به تجزیهٔ شیمیایی چاه‌های آب آشامیدنی شهرستان یزد

	TH	Ca	Mg	Na	K	NO3	SO4	CL	Ghalyaiat	TDS	EC
TH	۱										
Ca	۰/۹۳**	۱									
Mg	۰/۹۶**	۰/۷۷**	۱								
Na	۰/۵۲**	۰/۵۰**	۰/۴۸**	۱							
K	۰/۰۹ ns	۰/۰۶ ns	۰/۱۱ ns	۰/۲۶ ns	۱						
NO3	۰/۴۶**	۰/۴۵**	۰/۴۲**	۰/۳۱*	۰/۱ ns	۱					
SO4	۰/۸۸**	۰/۸۳**	۰/۸۳**	۰/۶۵**	-۰/۰۳ ns	۰/۵۰**	۱				
CL	۰/۹۲**	۰/۸۸**	۰/۸۶**	۰/۷۱**	۰/۱۹ ns	۰/۳۸**	۰/۸۳**	۱			
Ghalyaiat	-۰/۲۵ ns	-۰/۳*	-۰/۱۸ ns	-۰/۰۹ ns	۰/۷۳**	-۰/۰۵ ns	-۰/۳۹**	-۰/۲۶ ns	۱		
TDS	۰/۹۱**	۰/۸۶**	۰/۸۵**	۰/۷۲**	۰/۲۴ ns	۰/۴۱**	۰/۸۵**	۰/۹۵**	-۰/۱۷ ns	۱	
EC	۰/۹۱**	۰/۸۶**	۰/۸۵**	۰/۷۳**	۰/۲۴ ns	۰/۴۱**	۰/۸۶**	۰/۹۶**	-۰/۱۸ ns	۰/۹۹**	۱

معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ** : معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ و ns : غیر معنی‌دار.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود بین TDSو EC همبستگی مثبت معنی‌دار و قوی وجود دارد (r=۰/۹۹). تقی‌زاده مهرجردی و همکاران[۴۰] نیز همبستگی بالایی (r=۰/۹۹) بین این دو شاخص بدست آوردند. شاخص‌های TDS و EC همبستگی معنی‌دار مثبتی با سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، کلسیم (Ca)، سختی کل (TH)، نیترات(NO3)، سولفات (SO4) و کلر(Cl) دارند. همچنین همبستگی Ca، So4 و Cl با EC قوی‌تر از همبستگی Na و Ca با EC است، می‌توان نتیجه گرفت نقش آنیون‌ها در EC بیشتر از کاتیون‌ها بوده است.

۲،۳. نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی به کار رفته در تحقیق حاضر

در ابتدا برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی، از روش‌های درون‌یابی کریجینگ ساده (با

سه مدل کروی، گوسی و توانی)، کریجینگ معمولی (با سه مدل کروی، گوسی و توانی) و عکس مجذور فاصله برای هر کدام از پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی استفاده شد و سپس با توجه به مقادیر RMSE و ME، بهترین روش درون‌یابی برای تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی انتخاب شد. جدول (۴) نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی به کار رفته برای انتخاب بهترین روش پهنه‌بندی را نشان می‌دهد.

جدول۴. مقادیر RMSE روش‌های مختلف درون‌یابی به کار رفته برای انتخاب بهترین روش پهنه‌بندی

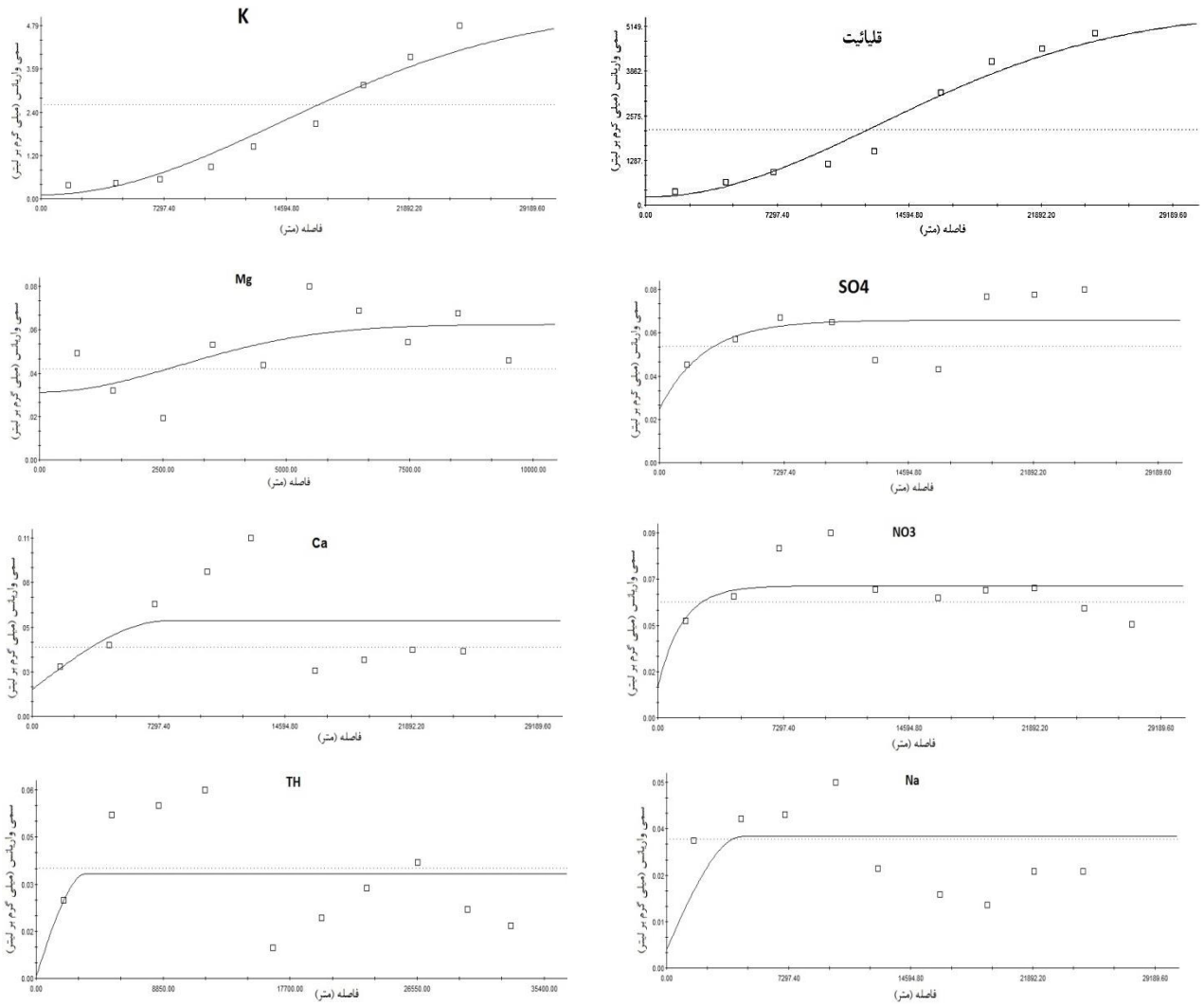
روش‌ها / پارامترها	IDW	Ordinary kriging			Simple kriging		
	Models	Spherical	Guassian	Exponential	Spherical	Guassian	Exponential
TH	۱۴۶	۱۴۴/۷	۱۴۶/۵	۱۴۷/۲	۱۴۳/۲	۱۴۴/۲	۱۴۴/۵
Ca	۲۵/۸	۲۵/۷	۲۵/۶	۲۵/۹	۲۵/۳	۲۶/۲	۲۵/۴
Mg	۲۱/۸۵	۲۱/۴۸	۲۱/۶۱	۲۱/۵۸	۲۱/۲۴	۲۱/۲۰	۲۱/۳۵
SO4	۱۰۵/۶	۹۴/۰۶	۹۳/۱۹	۹۵/۱۵	۹۳/۵۹	۹۲/۷۰	۹۲/۵۰
K	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۶۰	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۵۹	۰/۷۰
قلیائیت	۲۵/۸۷	۲۶/۲۹	۲۵/۸۹	۲۶/۳۸	۲۶/۱۷	۲۵/۷۹	۲۶/۲۵
Na	۸۷/۴۴	۷۶/۵۰	۷۸/۰۳	۷۹/۴۸	۷۸/۰۸	۷۶/۶۷	۷۸/۸۳
NO3	۸/۱۵	۷/۶۵	۷/۶۰	۷/۴۰	۷/۶۲	۷/۶۰	۷/۶۰
TDS	۳۲۷/۵	۳۴۵/۸	۳۴۹/۶	۳۴۶/۹	۳۴۱	۳۳۲/۶	۳۴۲/۹
EC	۵۰۹/۹	۵۳۶/۴	۵۴۰/۶	۵۳۶/۷	۵۳۳	۵۳۵/۹	۵۳۰/۷
CL	۱۲۰/۵	۱۲۴/۶	۱۲۴/۴	۱۲۵/۳	۱۲۲/۴	۱۲۳/۴	۱۲۲/۸

همان طور که در جدول(۴) نشان داده شده است برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای TH، Ca، Mg، SO4، K و قلیائیت بهترین روش درون‌یابی روش کریجینگ ساده می‌باشد. جهت پهنه‌بندی پارامترهای NO3 و Na روش درون‌یابی کریجینگ معمولی بهترین روش انتخاب شده است. بهترین مدل برازش داده شده به واریوگرام پارامترهای (Na، Ca و TH) مدل کروی، برای پارامترهای (K، Mg و قلیائیت) مدل گوسی و برای پارامترهای (NO3 و SO4) مدل نمایی است. در نهایت هم روش IDW بهترین روش برای پهنه‌بندی پارامترهای TDS، EC و Cl است. نتایج به دست آمده از ارزیابی و مقایسهٔ مقادیر RMSE روش‌های درون‌یابی نشان داد که پارامترهایی که از ضریب تغییرات بیشتری برخوردار بودند (EC، TDS و Cl) از روش IDW تبعیت نموده و شاخص‌هایی که از ضریب تغییرات کمتری برخوردار بودند با سایر توابع از جمله کریجینگ ساده و معمولی انطباق بیشتری نشان دادند. نتایج حاصل از این تحقیق با یافته‌های سایر محققان از جمله لاستت و همکاران [۲۲]، کرسیس [۲۰]، وب و انگلند [۴۱]، هاچینسون [۱۷]، تقی زاده مهرجردی و همکاران [۳۹] که نشان‌دهندهٔ دقت بالای روش‌های کریجینگ برای میان‌یابی است، مطابقت دارد. رضایی و همکاران [۳۲] روش کریجینگ معمولی و IDW با توان یک، فیضی و همکاران [۱۰] روش کریجینگ جهانی، شیخ گودرزی و همکاران [۳۷] روش کوکریجینگ را برای شبیه‌سازی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی با تأکید بر مصارف آب آشامیدنی به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی متغیر مورد نظر و در منطقهٔ مطالعاتی ویژه‌ای، معرفی کرده‌اند، لذا لازم است که برای هر منطقه و هر متغیر، بررسی‌های جداگانه انجام گرفته تا یک روش مناسب برای منطقهٔ مورد نظر و

پارامتر مورد بررسی، حاصل گردد.

۳،۳. تغییرات مکانی داده‌های مربوط به تجزیهٔ شیمیایی آب‌های زیرزمینی

خلاصهٔ آماری مربوط به متغیرهای کیفی که در جدول (۱) ارائه شد، اطلاعات کافی در مورد چگونگی توزیع و تغییرات مکانی مقادیر متغیرها در سطح منطقه ارائه نمی‌کند. از این رو، در اینجا به بررسی زمین‌آماری متغیرهای مورد بررسی پرداخته شد که می‌تواند اطلاعاتی در مورد تغییرات مکانی متغیرها در سطح آبخوان فراهم کند. به منظور بررسی و مطالعهٔ تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفیت آب آشامیدنی شهرستان یزد، پس از نرمال‌سازی داده‌ها، واریوگرام‌های تجربی به طور مجزا برای تمام پارامترهای کیفیت آب در جهات مختلف جغرافیایی ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تمام پارامترهای کیفیت آب شرب همسانگرد می‌باشند و جهت جغرافیایی روی تغییرات این پارامترها تأثیری ندارد. نتایج مربوط به واریوگرام‌ها و تحلیل آنها در شکل (۲) و جدول (۵) ارائه شده است.



شکل ۲. تغییرنماهای پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی شهرستان یزد

جدول ۵. پارامترهای تغییرنمای متغیرهای مورد مطالعه

متغیر	روش	مدل	اثر قطعه‌ای	سقف	دامنهٔ تأثیر	وابستگی مکانی (درصد)	کلاس وابستگی مکانی	RMSE	ME
سختی کل (TH)	SK	کروی	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵	۳۵۱۰	۳	قوی	۱۴۳/۲	۲/۹
کلسیم (Ca)	SK	کروی	۰/۰۱۶	۰/۰۵۷	۷۷۸۰	۲۸	متوسط	۲۵/۳۰	۰/۷۶
منیزیم (Mg)	SK	گوسی	۰/۰۳۱	۰/۰۶۳	۴۰۰۰	۴۹	متوسط	۲۱/۲۰	۰/۲۳
پتاسیم (K)	SK	گوسی	۰/۱۱۰	۵/۲۳	۲۰۲۰۰	۲	قوی	۰/۵۹	-۰/۰۰۷
قلیائیت	SK	گوسی	۲۳۰	۵۵۷۰	۱۸۳۱۰	۴	قوی	۲۵/۷۹	-۰/۴۶
سولفات (SO4)	SK	نمایی	۰/۰۲۴	۰/۰۶۴	۲۶۲۰	۳۷	متوسط	۹۲/۵۰	-۰/۸۶
سدیم (Na)	OK	کروی	۰/۰۰۵	۰/۰۳۵	۴۵۰۰	۱۴	قوی	۷۶/۵۰	-۰/۷۷
نیترات (NO3)	OK	نمایی	۰/۰۱۵	۰/۰۶۶	۱۴۱۰	۲۳	قوی	۷/۴۰	-۱/۱
کل مواد جامد محلول (TDS)	IDW	-*	-	-	-	-	-	۳۲۷/۵۰	۰/۷۰
هدایت الکتریکی (EC)	IDW	-	-	-	-	-	-	۵۰۹/۹۰	۴/۱۰
کلر (CL)	IDW	-	-	-	-	-	-	۱۲۰/۵۰	۱/۱۸

*در روش IDW قسمت همسانگردی و تحلیل واریوگرام انجام نمی‌گیرد.

بهترین مدل برای واریوگرام‌های Ca، Na و TH با توجه به شاخص‌های آماری ME و RMSE کروی می‌باشد. یکسانی مدل واریوگرام این سه شاخص را می‌توان به وجود همبستگی مثبت، معنی‌دار و قوی بین آنها و تغییرات مکانی مشابه آنها در آبخوان نسبت داد. بهترین مدل برای واریوگرام‌های پتاسیم (K)، قلیاییت و منیزیم (Mg) با توجه به شاخص‌های آماری ME و RMSE گوسی تشخیص داده شد. یکسانی مدل واریوگرام‌های پتاسیم و قلیائیت را نیز می‌توان به وجود همبستگی مثبت، معنی‌دار و قوی بین آنها و تغییرات مکانی مشابه آنها در آبخوان نسبت داد. تحقیق حاضر با نتایج تحقیق قهرمان و همکاران [۱۲] از نظر نوع مدل برازش داده به پارامتر نیترات مطابقت دارد. در صورتی که با یافته‌های نظری‌زاده و همکاران [۲۷] از نظر نوع مدل برازش داده به پارامتر سولفات و مقادیر دامنه تأثیر و میزان سقف آن مطابقت ندارد. تحقیق حاضر با یافته‌های حاصل از تحقیق محمدی و همکاران [۲۵] نیز از نظر نوع روش به کار رفته برای پهنه‌بندی میزان املاح محلول آب نیز مطابقت ندارد. ثمین و همکاران [۳۴] نیز در تحقیق خود بهترین مدل برازش داده شده به پارامتر کلر را مدل گوسی با اثر قطعه‌ای ۰/۳۷، حد آستانه ۱/۹۸ و دامنهٔ تأثیر ۴۹۱۰۰ متر برآورد نمودند در حالی که در تحقیق حاضر بهترین روش درون‌یابی برای پارامتر مذکور بر اساس مقدار RMSE روش IDW شناخته شد. نتایج تحلیل واریوگرام در تحقیق حاضر نیز با نتایج دش و همکاران [۷] و ناس [۲۶] مطابقت ندارد.

مقدار اثر قطعه‌ای در بین پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی از ۰/۰۰۱ تا ۲۳۰ به ترتیب برای سختی کل و قلیائیت متغیر بود، در حالی که وابستگی مکانی در منیزیم بیشترین (۴۹) و در پتاسیم کمترین (۲) بود که به ترتیب نشان‌دهندهٔ همبستگی مکانی متوسط و قوی بین این ویژگی‌های مورد بررسی است. از آنجا که اثر قطعه‌ای به دلیل تغییرات در فواصل کم و یا خطا در نمونه‌برداری و تجزیهٔ آزمایشگاهی نمایان می‌شود، بنابراین بیشتر بودن همبستگی مکانی برای منیزیم و کمتر بودن آن برای پتاسیم نشان می‌دهد که میزان تغییرپذیری در فواصل کم و یا خطا در نمونه‌برداری و اندازه‌گیری نسبت به سایر ویژگی‌ها برای منیزیم بیشتر و برای پتاسیم کمتر بوده است. به عبارتی ۴۹ درصد از تغییرات منیزیم بدون ساختار مکانی مشخص و مابقی

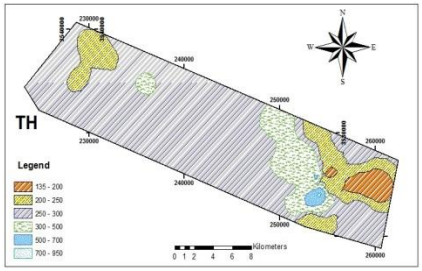
دارای ساختار مکانی بوده است در حالی که ۹۸ درصد از تغییرات غلظت پتاسیم ساختاردار و تنها حدود ۲ درصد بدون ساختار بوده است. چنانچه وابستگی مکانی کمتر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد و بیشتر از ۷۵ درصد باشد کلاس وابستگی مکانی به ترتیب قوی، متوسط و ضعیف خواهد بود. کلاس وابستگی مکانی ویژگی‌های مورد مطالعه از متوسط تا قوی متغیر است. نسبت اثر قطعه‌ای به سقف (وابستگی مکانی) برای پارامترهای سدیم، پتاسیم، قلیائیت، نیترات و سختی کل کمتر از ۲۵ درصد به دست آمد که وجود وابستگی مکانی قوی را نشان می‌دهد. برای پارامترهای کلسیم، منیزیم و سولفات بین ۲۵ تا ۷۵ درصد به دست آمد که وجود وابستگی مکانی متوسط را نشان می‌دهد.

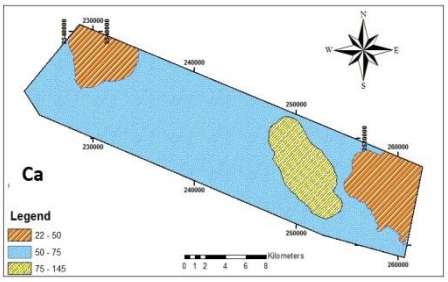
مقدار سقف نیم‌تغییرنما که نشان‌دهندهٔ کل تغییرپذیری است در محدوده ۰/۰۳۵ (برای سختی کل و سدیم) تا ۵۵۷۰ (برای قلیائیت) متغیر بود. به جز در مورد پتاسیم و قلیائیت، مقدار سقف نیم‌تغییرنما در سایر ویژگی‌ها کمتر از یک بود. مقدار شعاع تأثیر (فاصله‌ای که متغیر در آن فاصله وابستگی مکانی نشان می‌دهد) در محدودهٔ ۱۴۱۰ تا ۲۰۲۰۰ متر به ترتیب برای نیترات تا پتاسیم متغیر است. دامنهٔ تأثیر (NO3 و SO4)، دامنهٔ تأثیر (K و قلیائیت) و دامنهٔ تأثیر (Mg، Na و TH) در منطقه شبیه به هم بود. شعاع تأثیر آنیون‌ها تقریباً یکسان به دست آمد. این موضوع با توجه به همبستگی مثبت معنی‌دار بین آنیون‌ها قابل توجیه است. حشمتی و بیگی هرچگانی [۳۳] دامنهٔ تأثیر را برای قابلیت هدایت الکتریکی، مواد جامد محلول، پ‌هاش، نسبت جذب سدیم و غلظت سدیم بین ۲۲۲۶ تا ۲۴۱۹ متر در شهرکرد گزارش کردند. دلیل کمتر بودن شعاع تأثیر این ویژگی‌ها در شهرکرد احتمالاً به دلیل کوهستانی بودن شهرکرد، متفاوت بودن ویژگی‌های اقلیمی، تشکیلات زمین‌شناسی و نوع سنگ‌ها، وضعیت کوهستانی و مرتفع شهرکرد با سازندهای آهکی کرتاسه و از جنس آبرفت‌های آهکی شیلی، ذرات آنزیتی و ماسه سنگ و با میانگین بارش سالانهٔ بیش از ۵۰۰ میلی‌متر [۲۱] و بیشتر بودن تغییرات در این منطقه و مسطح بودن و طبیعت دشت‌گونهٔ منطقهٔ مورد مطالعه در این تحقیق که سبب کمتر شدن تغییرات و در نتیجه وابستگی مکانی و شعاع تأثیر بیشتر شده است. بنابراین در مناطق مسطح نسبت به مناطق کوهستانی می‌توان از اندازه‌گیری‌ها در فواصل دورتری برای برآورد در نقاط فاقد اندازه‌گیری و پهنه‌بندی ویژگی‌های کیفی آب با استفاده از روش‌های زمین آماری استفاده کرد (نتایج تخمین در مناطق مسطح و با پیوستگی مکانی بیشتر، دقیق‌تر و قابل اعتمادتر از نتایج تخمین در مناطق کوهستانی و به شدت متغیر می‌باشد زیرا در مناطق کوهستانی عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی مانند شرایط توپوگرافی، تشکیلات زمین‌شناسی، نوع سنگ‌ها و حتی ویژگی‌های اقلیمی دارای تغییرات بیشتری نسبت به مناطق مسطح می‌باشند).

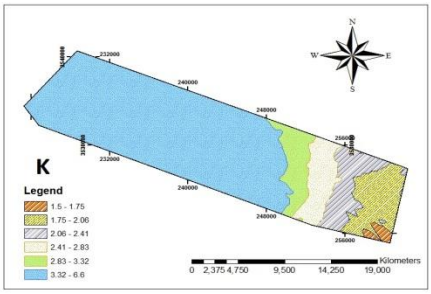
۴،۳. تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی شهرستان یزد

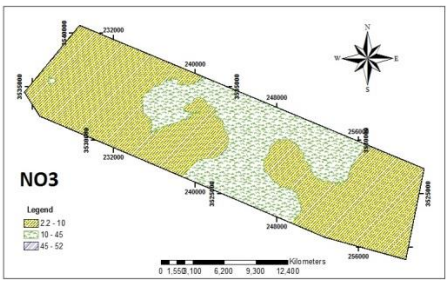
نقشه‌های پهنه‌بندی مربوط به پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی شهرستان یزد در شکل (۳) نشان داده شده است.

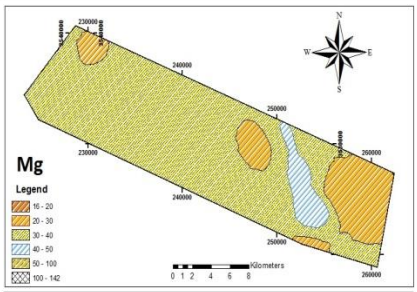
نقشهٔ پهنه‌بندی هدایت الکتریکی نشان می‌دهد که حداقل هدایت الکتریکی در منطقهٔ جنوب شرقی، مربوط به چاه‌های یزدگرد و برخی از چاه‌های ناحیهٔ دهنو یزد می‌باشد که دارای هدایت الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. در منطقهٔ چرخاب میزان هدایت الکتریکی بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و در جهت شمال به سرعت به شوری آن افزوده می‌شود. در مجموع کیفیت آب در منطقهٔ جنوب شرق و شمال غرب مناسب است که علت آن تغذیه با جریانات زیرقشری و یا سطحی از رودخانه‌های تفت و مهریز می‌باشد که هر دو از کیفیت مناسبی برخوردارند.

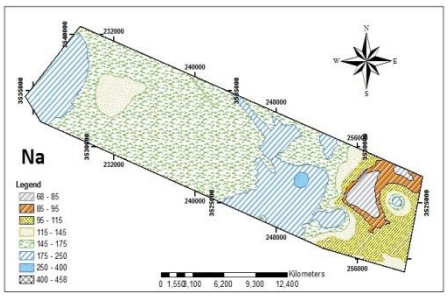


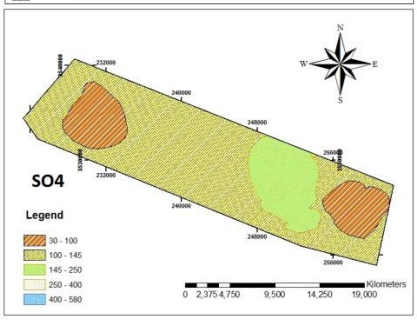


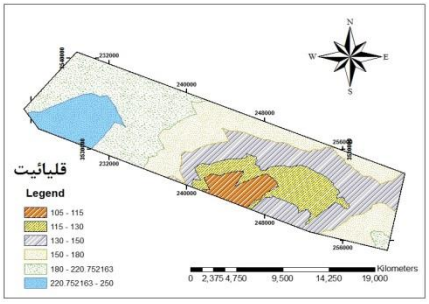


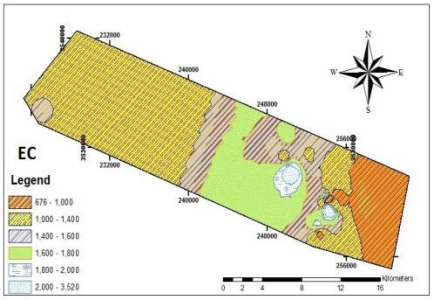


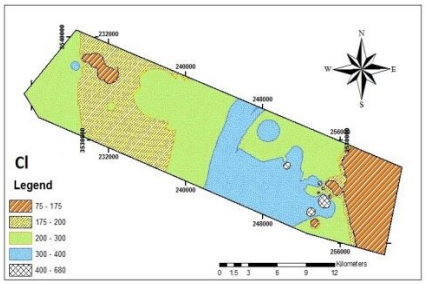


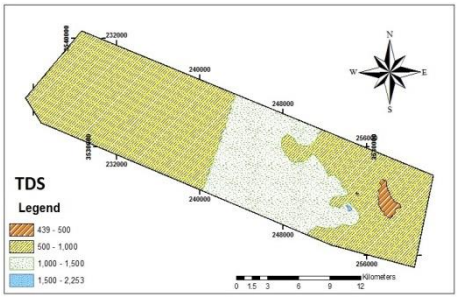












شکل ۳. نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی دشت یزد

از دیگر آنیون‌هایی که در تمام آب‌های طبیعی یافت می‌شود کلر است. غلظت‌های بالای کلرور باعث ایجاد کاهش کیفیت در آب آشامیدنی می‌گردد، علاوه بر آن مقادیر زیاد آن نیز می‌تواند سبب ایجاد سمیت گردد. حد آستانهٔ طعم برای کلرور به نوع کاتیون ترکیبی با آن بستگی دارد [۲]. مطابق شکل (۳) در محدودهٔ مطالعاتی تنها منطقهٔ جنوب شرق و شمال غرب مقادیر مناسبی از میزان کلر را دارا می‌باشد و سایر نقاط بیش از حداکثر مجاز کلر دارد.

کل مواد جامد محلول شامل مجموع مواد جامدی است که در آب محلول است، ولی شامل رسوبات معلق، کلوئیدها و گازهای محلول نمی‌شود. TDS پارامتر بسیار مؤثری در ایجاد کیفیت آب آشامیدنی است. کل مواد جامد محلول مجاز برای آب‌های آشامیدنی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. مقادیر بیشتر در آشامیدن و پختن غذا تولید اشکال می‌نماید. برای شستشوی لباس و استفاده در دیگ‌های بخار نیز نباید باقیماندهٔ تبخیر بیشتر از ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر باشد. در منطقهٔ مورد مطالعه از نظر مقدار کل مواد جامد محلول به جز برخی از چاه‌های واقع در جنوب شرق منطقه (چاه‌های یزدگرد)، بقیه چاه‌ها دارای TDS بیش از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد و چاه‌های بخش میانی منطقه (از جمله چاه‌های ۱۶ سیلو، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو) دارای TDS بیش از ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. البته طبق استاندارد ملی میزان حداکثر مجاز برای TDS را ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و حداکثر مطلوب ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر عنوان شده است.

در منطقهٔ مورد مطالعه میزان سختی بسیار متفاوت است. آب‌های جنوب شرق منطقه (چاه‌های یزدگرد) از میزان سختی کمتری برخوردار بوده (۱۳۵ تا ۲۰۰ میلی-گرم بر لیتر) و برای سایر چاه‌های محدودهٔ شهر یزد میزان سختی کل بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و در برخی از چاه‌های بخش جنوبی و جنوب شرقی از جمله چاه‌های رحمت آباد، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو بیش از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد.

چاه‌های مورد مطالعه از نظر میزان غلظت عناصر کلسیم و منیزیم دچار محدودیت نیستند و میزان غلظت این عناصر طبق استاندارد ملی می‌باشد (حداکثر مجاز کلسیم و منیزیم به ترتیب ۲۵۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر). مقادیر بیش از حداکثر مجاز کلسیم و منیزیم در اکثر آب‌ها باعث ایجاد سختی آب می‌شود و استفاده از آن را برای آشامیدنی و صنعت محدود می‌کند [۲].

سولفات در تمام آب‌های طبیعی به مقدار فراوان وجود دارد. سولفات‌های سدیم، منیزیم و پتاسیم به آسانی در آب محلولند اما سولفات کلسیم یا گچ قابلیت حل محدودی دارد. وجود سولفات در آب آشامیدنی می‌تواند ایجاد طعم قابل ملاحظه‌ای نماید. نامطلوب شدن آب با طبیعت کاتیون مربوطه متغیر است. بر اساس شکل (۳) منطقه محدودیتی از نظر میزان سولفات ندارد. تنها دو حلقه از چاه‌های میانی منطقهٔ مطالعاتی (۱۳ و ۲۴ دهنو) از نظر میزان غلظت سولفات بیش از حداکثر مجاز یعنی بیش از ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر، دارای سولفات می‌باشند. البته باید این نکته را خاطر نشان کرد که غلظت سولفات‌ها در صورتی که بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر باشد، مزهٔ تلخی ایجاد کرده و در غلظت بالاتر از ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در بدن سستی ایجاد می‌کند.

مطابق با نقشهٔ پهنه‌بندی غلظت نیترات، محدودهٔ مطالعاتی از نظر میزان نیترات دچار محدودیت نیست به جز چاه ۲۴ دهنو که دارای غلظتی بیش از حداکثر مجاز می‌باشد. حداکثر غلظت مجاز نیترات در آب آشامیدنی ۴۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. این یون کاملاً متحرک بوده و توسط آب نفوذی می‌تواند از لایه‌های خاک شسته شود. در نواحی که از کودهای شیمیایی ازته استفاده می‌گردد، حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد ازت به صورت نیترات توسط آب فرو نشت عمقی از منطقهٔ ریشه خارج می‌شود [۳۷]. وقتی مقدار نیترات از ۴۵ میلی‌گرم در لیتر بیشتر باشد، ممکن است بچه‌های کوچک (عموماً کمتر از ۴ ماه سن) از بیماری یرقان بمیرند. چاه‌های منطقهٔ مطالعاتی

به جز چاه‌های ۱۶ سیلو و ۶ یزدگرد از نظر میزان غلظت سدیم با توجه به استاندارد ملی (حداکثر مطلوب: ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر و حداکثر مجاز: ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) مشکلی ندارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب آشامیدنی شهرستان یزد از نتایج نمونه‌برداری شیمیایی ۵۵ حلقه چاه مربوط به سال ۱۳۹۴ استفاده شده است. برای ارزیابی و انتخاب بهترین روش درون‌یابی جهت تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب از روش‌های درون‌یابی، کریجینگ ساده (با سه مدل گوسی، کروی و توانی)، کریجینگ معمولی (با سه مدل گوسی، کروی و توانی) و روش عکس مجذور فاصله استفاده گردید. نهایتاً بهترین روش درون‌یابی برای پهنه‌بندی هر کدام از پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی با استفاده از شاخص آماری RMSE انتخاب شد. سپس با توجه به جداول استاندارد ملی کیفیت آب آشامیدنی، نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب آشامیدنی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده نشان داد که آب-های زیرزمینی منطقهٔ یزدگرد و چرخاب که به ترتیب در دو بخش جنوب شرقی و شمال غربی محدودهٔ مطالعاتی واقع هستند، متأثر از جریانات رودخانه‌های مهریز و تفت می‌باشند که از کیفیت مطلوبتری نسبت به چاه‌های بخش میانی محدودهٔ مطالعاتی برخوردار می‌باشند. دامنهٔ تغییرات شاخص‌های اصلی کیفیت از جمله TDS از کمتر از ۵۰۰ تا بیش از ۲۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و شاخص EC از کمتر از ۷۰۰ تا بیش از ۳۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است که این دستاورد بیانگر ضرورت مدیریت حساس بهره‌برداری و آماده‌سازی آب با کیفیت جهت ورود به شبکهٔ آشامیدنی می‌باشد. ضمناً چاه‌های بخش میانی منطقه (۱۶ سیلو، ۱۲ دهنو، ۱۳ دهنو و ۲۴ دهنو) از لحاظ پارامترهای کیفی TDS، TH، EC و Cl بیش از دو برابر حد مجاز استاندارد ملی می‌باشد که پیشنهاد می‌گردد نسبت به حذف و یا تعدیل بهره‌برداری از آن‌ها در شبکهٔ آب آشامیدنی یزد اقدام لازم اعمال گردد.

References

[1] Alavi panah, S.K., Khodaie, K. Jafarbigloo, M. (2006). Study the effectiveness of satellite data in the study of water quality on both sides of Miangozar of Oroumieh Lake. Geographical Research, 37(53): 57-69.

[2] Alizadeh, A. 2016. Principles of Applied Hydrology, 40 Edition, University of Emam Reza press.

[3] Banzhad, H. and Mohebzadeh, H. (2012). Assessment groundwater quality of Rezn-Ghahavand Plain for providing water of agriculture using GIS. 38: 99-110. (In Persian).

[4] Barcae, E., and Passarella, G. (2008). Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation: Acomparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation. Journal of invironmental monitoring and assessment, 133: 261-273.

[5] Burgess T.M., and Webster R. (1980). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties the semivariogram and punctual kriging, I. The semivariogram and punctual kriging. Journal of Soil Science. 31: 315-331.

[6] Cressies, N. (1991). Statistic for Spatial data. John Wiley and sons, New York, N.Y.

[7] Dash J.P., Sarangi A., and Singh D.K. (2010). Spatial variability of groundwater depth and quality parameters in National Capital Territory of Delhi. Environmental Management, 45: 640-650.

[8] Dindarlou, K., Alipoor, V., Farshidfar, Gh. (2006). Chemical Quality Beverage Water In Bandar Abas. Hormozgan Medical 2006, 10: 57-62. (In Persian).

[9] Ekrami, M., Ektesasi, M.R. and Amirbeygi, M.A. (2010). Investigation Effects of climatic drought on the intensity and time delay hydrological drought using GRI Index (case study: Yazd-Ardakan plain). MSc Thesiss, Yazd University, 100 pp. (In Persian).

[10] Feyzi, M.J., Feyznia, S. and Zare, M. (2011). Assessing Spatial changes of groundwater using the Geographic Information System (case study: Birjand Plain in Khorasan Jonoobi). 7th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering. Isfahan, Iran. (In Persian).

[11] Gallichand, J., Bouckland, D., Marcotte, D. and Henry, M.J. (1992). Spatial Interpolation of Soil Salinity and Sodisity a Saline Soil in Southern Alberta. Canadian Journal of Soil Science, Vol. 72, PP: 503-516.

[12] Ghahraman, B., Hosseini, M., and Asgari, H. (2004). The application of geostatistics to assess groundwater quality monitoring networks. Journal of Amirkabir University of Technology, 14(55): 971-981.

[13] Hasani pak, A.A. (1999). Geostatistics. University of Tehran press. 314pages. (In Persian).

[14] Hengel, T., Huvelink, G.B.M. and Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variabls based on regression–kriging. Geoderma, 120:75-93.

[15] Heshmati, S. and Beygi harchagani, H. (2012). Zonation of Shahrekord groundwater quality indices for using in the design of irrigation systems. Water Research in agricultural. 26(1):43-59. (In Persian).

[16] Hoseini, S.M., Ghahreman, B. and Asgari, H. (2003). Sulphate in Mashhadgroundwater using kriging method. Estimation of electrical conductivity. In: Mostofinejad, D., Asghari, K., and Chamani, M.R. (eds.), Proceeding of the 6th International Conference on Civil Engineering (ICCE), Arkan, Isfahan, (In Persian).

[17] Huchinson, M.F. (1991). Continent Wide Data Assimilation system. BMRC Research Report No. 27, Melbourne Bureau of Meteorology. PP: 104-113.

[18] Dehghani, F., Rahnamaie, R., Malakoti, M.G. and Saadat, S. (2012). Investigation of the ratio of calcium to magnesium status in irrigation water of Iran. Journal of Water Research in Agriculture, 26(1): 113- 125.

[19] Izadi, A., Alizadeh, A., Davari, A. and Ghahraman, B. (2008). Management of groundwater resources in arid and semi arid zones (Case study: Neyshaboor plain). 9th seminar on irrigation and reduce evaporation, University of Shahid Bahonar Kerman.

[20] Kresic, N. (1997). Hydrogeology and groundwater modeling. Lewis Publishers, USA.

[21] Lalehzari, R. and Tabatabaie, S.G. (2011).Chemical properties of groundwater of Shahrekord Plain. Ecology. 36(53): 55-62.

[22] Lastett, G., Mcbratney, M., Phal, A.B. and Huchinson, M.F. (1987). Comparison of Several Spatial Predication Method for Soil Ph, Journal of Soil Science. Vol.38, PP: 325-341.

[23] Mahdavi, M. 2000. Applied Hydrology, 2ed Edition, University of Tehran press.

[24] Mogheir, Y., Lima, J.L.M.P. and singh, V.P. (2004). Characterizing the spatial variability of groundwater using the entropy theory: case study from Gaza Strip. Hydrological Process, 18: 2579-2590.

[25] Mohammadi, M., Mohammadi ghalah ney, M. and Ebrahimi, K. (2012). Spatial and Temporal Variations of Groundwater Quality of Qazvin plain. Journal of Iran Water Research. 5(8): 41-52.

[26] Nas, B. (2009). Geostatistical approach to assessment of spatial distribution of groundwater quality. Polish Journal of Environmental Studying, 6: 1073-1082.

[27] Nazarizadeh, F. Ershadian, B. and Zandvakili, K. (2006). A survey on spatial variations of groundwater quality in Khozestan province. First Regional Conference on optimal utilization of water resources in the watersheds of Karoun and Zayandehroud. Shahrekord university. 1240pages. (In Persian).

[28] Nazarizadeh, F., Arshadian, B. and Zandvakily, K. (2006). Spatial variability analysis of groundwater quality Balaroud Plain in Khuzestan province. First regional conference on optimal utilization of water resources in the watersheds of Karoun and Zayandehroud., University of Shahrekord. 1236-1240.

[29] Ng, S.M.Y., Wail, O.W.H., Xul, Z.H., Lil, Y.S., Jiang, Y.W. (2005). Application of GIS for Retrieval and Display of Hydrodynamic and Water Quality Data for the Pearl River Estuary. Environmental Informatics Archives, Vol.3, PP: 372-378.

[30] Ostovari, Y., Beigi Harchegani, H. and Davoodian, A.R. (2012). Spatial variation of nitrate in the Lordegan aquifer. Water and Irrigation Management, 2(1), 55-67.

[31] Pour Moghadas, H. (2003). A study of ground water quality in Lenjan township of isfahan province. Journal of the School of Public Health and Institute of Public Health Research, 1(4) :31-40.

[32] Rezaei, M., Davatgar, N. and Tajdari, Kh. (2010). Investigation the Spatial variability of some important groundwater quality factors in Guilan, Irans Journal of Water & Soil, 24(5): 932-941. In Farsi.

[33] Samadi, M.T., Saghi, M.H., Rahmani, A. Torabzadeh, H. (2009). Zoning of Water Quality of Hamadan Darreh-Morad Beyg River Based on NSFWQI Index Using Geographic Information System. Sci J Hamadan Univ Med Sci. 16 (3) :38-43

[34] Samin, M., Soltani, J., Zeraatcar, Z., Moasheri, S.A. and Sarani, N. (2012). Spatial estimation of groundwater quality parameters based on water salinity data using kriging and cokriging methods. International Conference on Transport, Environment and Civil Engineering, 25-26 August, Kuala Limpur, Malaysia.

[35] Shabani, M. (2009). Determination of the Most Suitable Geostatistical Method for Spatial variation the pH and TDS of groundwater (case study: Arsenjan Plain). Journal of Water Engineering. 1: 47-58.

[36] Shahraki J, and Mohseni S (2013) Compromise multi criteria decision making application in water resources optimal allocation Case study Yazd city. Journal of Irrigation & Water Engineering 12:107-117.

[37] Sheikh Goodarzi, M., Mousavi, S.H. and Khorasani, N. (2012). Imulating Spatial Changes in Groundwater Qualitative Factors Using Geostatistical Methods (Case Study: Tehran-Karaj Plain). Journal of Natural Environment, 65(1):83-93. (in Farsi).

[38] Taghizadeh mehrjerdi, R., Mahmoodi, Sh., Khazaie, S.M. and Heydari, A. (2008). Spatial variability of salinity in groundwater with geostatistics (Case study:Rafsanjan). 2nd Conference of Environmental Engineering. (In Persian).

[39] Taghizadeh mehrjerdi, R., Zareian jahromi, M., Mahmoodi, Sh., Heydari, A. and Sarmadian, F. (2008). Investigation spatial interpolation methods for spatial variations of quality characteristics of groundwater in Rafsanjan plain. Iran-Watershed Management Science and Engineering. 5: 63-70. (In Persian).

[40] Taghizadeh Mehrjerdi, R., Zareian, M., Mahmodi, Sh., and Heidari, A. (2008). Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (Case study: Yazd-Ardakan plain). World Applied Science Journal, 4(1): 9-17. In Farsi.

[41] Webe, D., England, E. (1992). Evaluation and Comparison of spatial Interpolation. Mathematical Geology, 24: 381-391.

[42] Widory, D., Kloppmann, W., Chery, L., Bonnin, J., Rochdi, H. and Guinamant, J. (2004). Nitrate in groundwater: an isotopic multi-tracer approch. Contaminant Hydrology, 72(4): 165-188.

[43] Yamamoto, J.K. (2000). An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates. Mathematical Geology, 32: 489-497.

[44] Yasrebi, J., Sharifi, M., Fathi, H., Karimian, N., Emadi, M. and Baghernejad, M. (2008). Spatial variability of soil fertility properties for precision agriculture in southern Iran. Journal of Applied Sciences, 8(9):1612-1650.