نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۶، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۱، ص. ۹۴-۸۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 16, Apr.-May. 2022, p. 83-94

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی پراکنش مکانی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی در منطقه ترکمنچای

هادی ترکیان ایورقی[۱]، ناصر نظری[۲*]، علی فرامرزی[۳]، علی خانی[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

چکیده

تغییرات مکانی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی، از جمله عوامل تأثیرگذار بر سیاست‌های مدیریت برداشت و مصرف این منابع هستند. در مناطق اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، آب‌های زیرزمینی از جمله منابع مهم جهت بهره‌برداری برای مقاصد مختلف به‌خصوص کشاورزی و شرب محسوب می‌شوند که بررسی شاخص‌های کیفی آن در راستای ارزیابی امکان استفاده از آب‌های زیرزمینی در بخش‌های مختلف حائز اهمیت است. در این پژوهش، دقت روش‌های زمین‌آمار کریجینگ و کوکریجینگ و نیز روش‌های قطعی عکس فاصله وزن‌دار و توابع پایه شعاعی جهت پیش‌بینی پراکنش مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی شامل غلظت کلر، سدیم، منیزیم، کلسیم، سولفات، نسبت جذبی سدیم، غلظت کل املاح و هدایت الکتریکی در منطقه ترکمنچای موردبررسی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی نتایج از روش ارزیابی متقابل و شاخص‌های MAD، RMSE و R استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، روش کوکریجینگ بهترین روش پهنه‌بندی تمام شاخص‌های موردمطالعه می‌باشد. مقادیر RMSE برای هدایت الکتریکی معادل ۱۳۰/۶۷ میکرو موس بر سانتی‌متر، غلظت کل املاح معادل ۶۱/۱۳ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت کلسیم معادل ۰/۸۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، غلظت منیزیم معادل ۰/۵۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، غلظت سدیم معادل ۰/۶۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، غلظت کلر معادل ۰/۴۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، غلظت سولفات معادل ۰/۵۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و نسبت جذبی سدیم معادل ۰/۳۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر گزارش شد. همچنین ارزیابی نتایج حاصل از پراکنش مکانی شاخص‌ها نشان داد که منابع آب‌های زیرزمینی در کل منطقه موردمطالعه وضعیت مطلوبی جهت استفاده برای مصارف مختلف دارد که این امر در نیمه شمالی محدوده مطالعاتی مشهودتر است. با توجه به روند تغییرات غلظت عناصر در محدوده روستای خواجه غیاث به‌منظور بهبود شرایط و ارائه سیاست-های برداشت و مصرف از آب‌های زیرزمینی با هدف جلوگیری از افت کیفیت آب توصیه می‌شود پایش کیفی آب به‌صورت منظم انجام شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی متقابل، روستای خواجه غیاث، زمین‌آمار، کریجینگ، کوکریجینگ

مقدمه

شناخت نحوه تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و آسیب‌پذیرترین منابع تأمین آب موردنیاز کشاورزی، صنعت و شرب، بسیار حائز اهمیت است. روش‌های مختلفی برای مطالعه و پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و اطلاعات، دارای دقت‌های مختلفی می‌باشند. استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی یا سیستم اطلاعات مکانی در راستای جمع‌آوری، ورود، ذخیره‌سازی، ارزیابی، بازیابی، مدیریت، تجزیه‌وتحلیل و نمایش داده‌های توصیفی و مکانی به‌صورت مرتبط با هم در علوم مختلف از جمله کشاورزی و علوم آب‌وخاک توسعه یافته است. ازآنجایی‌که به دلیل وجود محدودیت‌های عملی، امکان نمونه‌برداری جامع برای تعیین یک خصوصیت مشخص وجود ندارد؛ می‌توان با استفاده از روش‌های درون‌یابی به‌عنوان ابزاری جهت آنالیز و نمایش مقادیر مربوط به مشخصه موردنظر در مکان‌های

۱- دانشجوی دکتری شیمی و حاصلخیزی خاک، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران
۲- استادیار گروه شیمی و حاصلخیزی خاک، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران
۳- استادیار گروه زراعت، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران
۴- استادیار گروه شیمی و مهندسی شیمی، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email:Nas.Nazari@Gmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.1.7.4

نمونه‌برداری نشده استفاده کرد. مطالعات مختلفی نیز در این زمینه صورت گرفته است. قهرمان و همکاران (۱۳۸۲) در تحقیق خود تحت عنوان کاربرد زمین‌آمار 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 سقف دار می‌باشد. همچنین ایشان با استفاده از روش کریجینگ، نقشه‌های توزیع شاخص‌های موردبررسی و نیز خطای تخمین این خصوصیات کیفی را ارائه نمودند. محمدی و همکاران (۱۳۸۶)، در بررسی تغییرات مکانی کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی دشت کرمان به این نتیجه رسیدند که برای برآورد توزیع مکانی مقادیر کلر، سدیم، سولفات، هدایت الکتریکی، غلظت املاح محلول و pH، کوکریجینگ روش مناسبی می‌باشد. محمدی و همکاران (۱۳۹۱) تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت کرمان را با استفاده از روش زمین‌آماری مناسب در طی یک دوره آماری ۱۰ ساله موردمطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که واریوگرام مدل گوسی به‌عنوان بهترین مدل برازش شده به ساختار فضایی داده‌ها و روش عکس فاصله به توان ۵ در ابتدای دوره و عکس فاصله به توان ۴ در انتهای دوره بهترین روش میان-یابی عامل سطح آب می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از پهنه‌بندی، حکایت از افت سطح آب زیرزمینی در بیشتر نقاط دشت دارد. دهقانی و نورعلیئی (۱۳۹۵) به‌منظور تخمین سطح آب زیرزمینی دشت نورآباد، از روش‌های زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی استفاده و گزارش کردند که روش کوکریجینگ ساده با مدل دایره‌ای نسبت به سایر روش‌ها در اولویت قرار دارد و روش کوکریجینگ توانایی بالایی در درون‌یابی و تخمین مقادیر کمینه و بیشینه سطح آب‌های زیرزمینی دارد. پورخباز و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از ۳۶۴ نمونه آب زیرزمینی برداشت‌شده و با بهره‌گیری از روش‌های زمین‌آمار، خصوصیات شیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت قزوین را جهت کاربری کشاورزی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که ۳۴ درصد از منطقه برای کشاورزی مناسب، ۵۱ درصد نسبتاً مناسب و ۱۵ درصد نامناسب است. لذا ایشان کیفیت آب منطقه موردمطالعه را از نظر کشاورزی مطلوب گزارش کردند. کاشی زنوزی و همکاران (۱۳۹۷) به‌منظور ارزیابی روند تغییرات پارامترهای کیفی آب زیرزمینی شامل TDS، EC، SAR، Cl^- و SO_4^{2-}، از اطلاعات مربوط به چاه‌های پیزومتری طی سال‌های آماری ۸۴، ۸۸ و ۹۱ استفاده نمودند و با روش‌های زمین‌آمار شامل روش کریجینگ معمولی در حالت‌های کروی، گوسی و نمایی و روش فاصله معکوس وزن‌دار با توان‌های ۱ تا ۳ موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بر اساس روش ارزیابی متقابل، روش کریجینگ در مقایسه با روش فاصله معکوس وزن‌دار خطای کمتری داشت. اژدری و حسینی (۱۳۹۷) تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت سگزی اصفهان را با استفاده از زمین‌آمار موردمطالعه قرار دادند. ایشان برای این منظور از نمونه‌های آب زیرزمینی ۴۴۵ چاه، چشمه و قنات استفاده کردند. نتایج نشان داد که کلیه پارامترهای موردبررسی، با استفاده از روش کریجینگ معمولی کمترین مقدار RMSE را داشته و جهت تهیه نقشه توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی از این روش استفاده شد. ایشان همچنین گزارش کردند که از نظر شرب، پارامترهای TH، EC و TDS محدودیت ایجاد کرده‌اند. سیدمحمدی و متین فر با استفاده از روش‌های آماری و زمین‌آماری تغییرات مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را در بخش‌هایی از استان گیلان را موردبررسی قرار دادند. بدین منظور ۲۴۷ نمونه خاک از نقاط مشخص جمع‌آوری گردید. بر اساس شاخص‌های آماری ME، MAE و NRMSE کاربرد روش کوکریجینگ در مقایسه با روش کریجینگ نتایج دقیق‌تری را ارائه داد (Seyedmohammadi and Matinfar, 2018). ژو و آزبورن به بررسی توزیع کربن و نیتروژن در جنگل‌های کشور ایرلند با استفاده از روش‌های زمین‌آمار پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که روش کوکریجینگ در مقایسه با روش کریجینگ معمولی از دقت بالایی در پیش‌بینی مقادیر کربن و نیتروژن برخوردار بوده و همچنین نتایج این مطالعه یک ارزیابی آمار از تغییرات مکانی کربن و نیتروژن فراهم آورده و می‌تواند در بهبود ارزیابی مقدار کربن و نیتروژن اکوسیستم‌های جنگلی مفید واقع گردد (Zou and Osborne, 2021). در پژوهشی دیگر، موناز- ناجرا و همکاران تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای فیزیکوشیمیایی سد تناگو در کشور مکزیک را ارزیابی نمودند. در این مطالعه متغیرهایی مانند دمای آب، اکسیژن غیر محلول، سختی آب، نیترات، نیتریت، فسفر، کادمیوم، کروم، مس و سرب در طی ۵ بار نمونه‌برداری در سال ۲۰۱۵ در ۳۴ ایستگاه نمونه‌برداری از آب مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. تجزیه‌وتحلیل نتایج نشان داد که فصلی بودن و فعالیت‌های انسانی در منطقه منجر به افزایش یا کاهش متغیرهای موردمطالعه شده و همچنین روش‌های زمین‌آمار قادر به ترسیم الگوی تغییرات مکانی این متغیرها هستند (Munoz- Najera et al., 2020).

بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی در راستای شناخت وضعیت کیفی آبخوان، منابع آلاینده و نیز ارائه راهکارهای مدیریتی در راستای بهبود وضعیت موجود حائز اهمیت است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه ترکمنچای جهت مصارف مختلف و نیز ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی در پراکنش مکانی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

در پژوهش حاضر، منطقه موردمطالعه واقع در استان آذربایجان

شرقی، شهرستان میانه، شهر ترکمنچای و روستاهای اطراف آن به مساحت حدود ۳۲۳ کیلومترمربع بوده و متوسط ارتفاع آن از سطح دریاهای آزاد ۱۷۱۰ متر می‌باشد. شهرستان میانه، در جنوب رشته‌کوه بزقوش قرار دارد. ارتفاع عمومی زمین در این شهرستان، از ۷۵۰ متر در منتهی‌الیه گوشه جنوب شرقی آن در دره قزل‌اوزن تا ۳۳۰۰ متر در قلل رشته‌کوه بزقوش متغیر است. شیب عمومی زمین به‌جز در گوشه جنوب شرقی شهرستان، در کلیه نقاط آن به سمت مرکز (شهر میانه) می‌باشد و در نهایت تمامی دامنه‌ها به قزل‌اوزن ختم می‌شوند. از نظر شکل زمین، قلل ۲۵۰۰ الی ۳۳۰۰ متری بزقوش و زمین های وسیع و کم شیب پایین آن در غرب دره گرمه چای ویژگی اصلی نیمه شمالی شهرستان را تشکیل می‌دهد. شهرستان میانه به‌جز در دامنه‌های پست دره قزل‌اوزن، در قسمت میانی و جنوب شرقی که دارای اقلیم خشک و سرد است، همچنین به‌جز ارتفاعات بالای ۱۸۰۰ متری بزقوش در شمال که دارای اقلیم ارتفاعات فوقانی می‌باشد، در سایر مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه سرد می‌باشد. متوسط بارش سالانه ۳۲۰ میلی‌متر در نقاط کم ارتفاع جنوب شرقی و در بالای ارتفاعات بزگوش از ۳۹۳ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر است.

پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های ۱۰۲ حلقه چاه مشاهداتی، چشمه و قنات انجام شده است. جمع‌آوری اطلاعات به‌صورت ماهانه و طی سال‌های ۱۳۹۲ الی ۱۴۰۰ صورت گرفت. پارامترهای موردنظر جهت ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی شامل غلظت کلر، سدیم، منیزیم، کلسیم، سولفات، نسبت جذبی سدیم، غلظت کل املاح و هدایت الکتریکی می‌باشند.

روش‌های درون‌یابی

با توجه به این‌که آمار کلاسیک قادر به در نظر گرفتن توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی نمی‌باشد، بنابراین از زمین‌آمار به‌عنوان تکنیکی برای این هدف استفاده می‌شود. امروزه به‌طور وسیعی از روش‌های مختلف زمین‌آماری برای پیش‌بینی تغییرات مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای مطالعه و پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و اطلاعات، دارای دقت‌های مختلفی می‌باشند. انتخاب روش مناسب پهنه‌بندی و تهیه نقشه تغییرات ویژگی‌های کیفی آب و خاک گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع کشاورزی در هر منطقه به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر از روش‌های زمین‌آمار شامل کریجینگ[1] و کوکریجینگ[2] و نیز روش‌های قطعی شامل مدل عکس فاصله[3] و توابع پایه شعاعی[4] به‌منظور پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده شده است.

کریجینگ

روش میان‌یابی کریجینگ، یکی از روش‌های پیشرفته و پرکاربرد زمین‌آماری است که بر اساس آنالیز نیم‌تغییرنما استوار است. کریجینگ تخمین‌گری ناریب است که تنها یک متغیر را پیش‌بینی می‌کند. کریجینگ، یک روش خطی درون‌یابی بهینه در زمین‌آمار می‌باشد که بهترین تخمین ناریب خطی را برای کمی کردن متغیرهای ناحیه‌ای انجام می‌دهد (قهرودی تالی، ۱۳۸۱). شرط ناریب بودن در سایر روش‌های تخمین نیز اعمال می‌شود؛ لکن ویژگی کریجینگ در آن است که در عین ناریب بودن، واریانس تخمین نیز کمینه می‌باشد. در واقع در روش کریجینگ از اطلاعات موجود به بهترین نحو استفاده شده است. لذا کریجینگ همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز ارائه می‌دهد که با بهره‌گیری از این ویژگی منحصربه‌فرد، می‌توان قسمت‌هایی را که در آنجا خطا زیاد است و برای کاهش آن به داده‌های بیشتری نیاز است را مشخص نموده و تحت پوشش قرار داد. همچنین، می‌توان میزان کاهش واریانس تخمین را به ازای یک نمونه اضافی قبل از نمونه‌گیری تعیین کرد. لذا با استفاده از واریانس تخمین می‌توان بهترین نقاط نمونه‌برداری را پیشنهاد کرد.

کوکریجینگ

همان‌طور که در آمار کلاسیک نیز روش‌های چند متغیره وجود دارد، در زمین‌آمار نیز می‌توان از روش کوکریجینگ و بر اساس میزان همبستگی بین متغیرهای مختلف، به‌منظور برآورد نقاط مجهول استفاده کرد. معادله کوکریجینگ به‌صورت زیر است (رابطه ۱):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{1i} Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^{m} \lambda_{2j} Z_2(x_j) \qquad (۱)$$

که در آن $Z_2(x_i)$ متغیر مکانی کمکی، $Z_1(x_i)$ متغیر مکانی اصلی، $Z^*(x_0)$ مقدار نامعلوم متغیر در نقطه x_0، m و n به ترتیب برابر با تعداد نقاط نمونه‌برداری متغیرهای اصلی و فرعی و λ_{1i} و λ_{2j} وزن‌های آماری اختصاص داده‌شده به متغیرهای اصلی و کمکی می‌باشند.

مدل عکس فاصله وزن‌دار

پایه و اساس روش وزن دادن عکس فاصله، وزن دهی بر اساس عکس فاصله تا نقطه تخمین است. به‌عبارت‌دیگر، در این روش برای هر کدام از نقاط اندازه‌گیری شده، بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول وزن مشخصی در نظر گرفته می‌شود. وزن

1- kiriging
2- cokriging
3- Inverse Distance Weighting
4- Radial Basis Functions

دهی بیشتر به نزدیک‌ترین نمونه‌ها و اختصاص وزن کمتر به نمونه‌هایی است که در فاصله بیشتر قرار گرفته‌اند. سپس این اوزان توسط توان وزن دهی کنترل می‌شود؛ به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچک‌تر، وزن‌ها را به‌طور یکنواخت‌تری بین نقاط هم‌جوار توزیع می‌کنند. شایان‌ذکر است که این روش بدون توجه به موقعیت مکانی و آرایش نقاط، فقط فاصله آن‌ها را مدنظر می‌گیرد. به این مفهوم که نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند، دارای وزن یکسانی می‌باشند (مهدیان ۱۳۸۵؛ تقی‌زاده مهرجردی و همکاران ۱۳۸۷).

توابع پایه شعاعی

توابع پایه شعاعی از لحاظ مفهومی مشابه با برازش یک غشای لاستیکی از طریق نقاط نمونه‌برداری شده است، درحالی‌که انحنای کل سطح را به حداقل می‌رساند. در روش توابع پایه شعاعی برای هر مکان داده یک تابع پایه شعاعی در نظر گرفته می‌شود و ترکیب خطی این توابع پایه منجر به پیش‌بینی در نقطه مجهول می‌گردد (رابطه ۲):

$$\bar{z}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \omega\varphi(\|s_i - s_0\|) + \omega_{n+1} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق φ تابع پایه شعاعی، $\|s_i - s_0\|$ فاصله اقلیدوسی بین مکان نیاز به پیش‌بینی (s_0) و مکان هر داده (s_i) و ω وزن‌ها بوده که نیاز به برآورد دارند. در مطالعه حاضر، از چهار تابع شامل اسپیلاین کاملاً منظم، اسپیلاین با تابع کششی، تابع مالتی کوادریک و تابع معکوس مالتی کوادریک به‌عنوان تابع پایه شعاعی در حل مسئله درون‌یابی استفاده شده است.

معیار ارزیابی نتایج

به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی روش‌های موردبررسی در پهنه‌بندی خصوصیات موردمطالعه، از تکنیک ارزیابی متقابل که یکی از مناسب‌ترین روش‌های ارزیابی نتایج حاصل از روش‌های مختلف زمین‌آمار است، استفاده شده است (Davis, 1987). برای این منظور در هر مرحله، یک نقطه مشاهده‌ای حذف‌شده و با استفاده از مختصات سایر نقاط موجود، مقدار آن نقطه برآورد گردید. این عمل برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار شد. همچنین، با استفاده از مدل‌های به‌دست‌آمده، در تعدادی از نقاطی که داده اندازه‌گیری وجود داشت نیز مقادیر برآورد شده، محاسبه شد. در نهایت به‌منظور ارزیابی کارایی روش‌های میان‌یابی از شاخص‌های آماری رایج مانند میانگین انحراف مطلق (رابطه ۳)، ریشه میانگین مربع خطا (رابطه ۴) و ضریب همبستگی استفاده شد.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^{n}|A_t - F_t|}{n} \qquad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(A_t - F_t)^2}{n}} \qquad (۴)$$

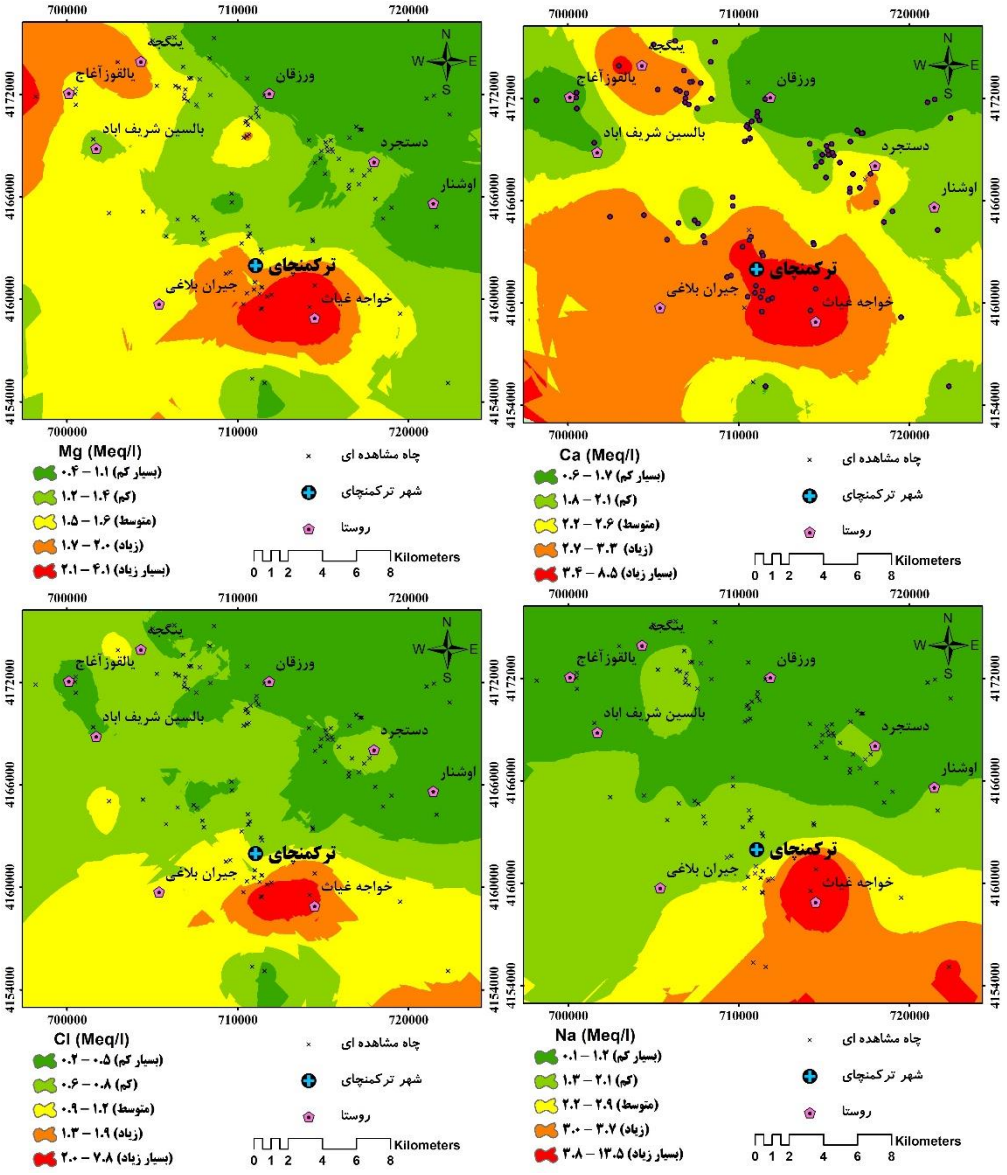
نتایج

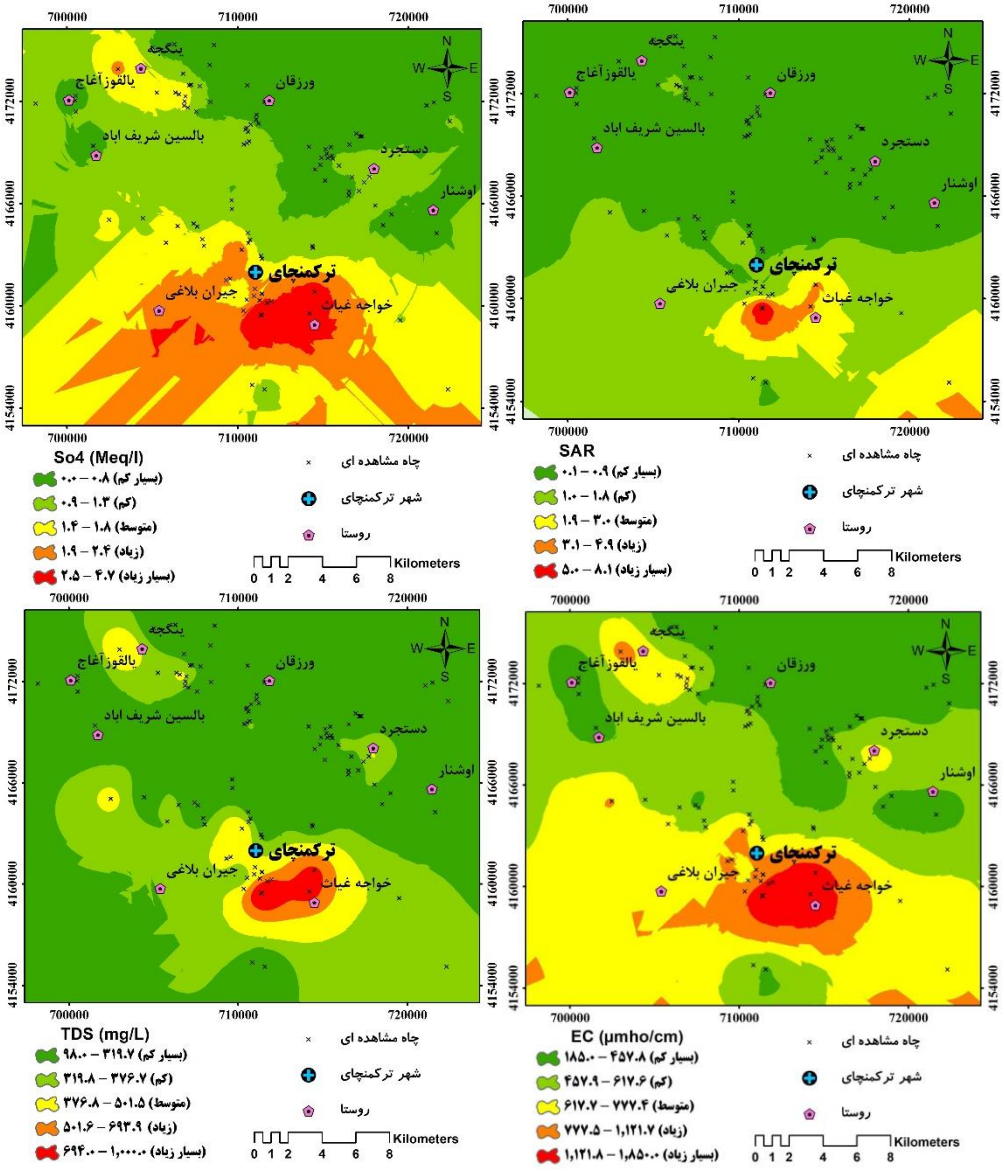
نتایج خلاصه آماری شاخص‌های کیفی موردمطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، هیچ‌یک از شاخص‌ها دارای توزیع نرمال نمی‌باشند. با توجه به این‌که پیش‌شرط استفاده از روش‌های زمین‌آمار شامل کریجینگ و کوکریجینگ، نرمال بودن داده‌هاست؛ لذا به‌منظور نرمال کردن داده‌ها از لگاریتم داده‌ها استفاده شد.

جدول ۱- آماره‌های داده‌های کیفی شاخص‌های اندازه‌گیری شده

پارامتر	واحد اندازه‌گیری	کمینه	متوسط	بیشینه	انحراف معیار
هدایت الکتریکی	میکرو موس بر سانتی‌متر	۱۸۵	۶۱۰	۱۸۵۰	۳۳۲/۹
نسبت جذبی سدیم	بی‌بعد	۰/۱۶	۱/۱۲	۸/۰۶	۱/۰۶
غلظت کل املاح	میلی‌گرم بر لیتر	۹۸	۳۳۱/۷۳	۱۰۰۰	۱۶۵/۳۷
غلظت کلسیم	میلی‌اکی‌والان بر لیتر	۰/۶۰	۲/۶۴	۸/۵۰	۱/۳۷
غلظت منیزیم	میلی‌اکی‌والان بر لیتر	۰/۴۰	۱/۵۷	۴/۱۰	۰/۸۲
غلظت سدیم	میلی‌اکی‌والان بر لیتر	۰/۱۶	۱/۶۸	۱۳/۵۰	۱/۹۹
غلظت کلر	میلی‌اکی‌والان بر لیتر	۰/۲۰	۱/۰۷	۷/۸۰	۱/۲۳
غلظت سولفات	میلی‌اکی‌والان بر لیتر	۰/۰۱	۱/۲۴	۴/۷۰	۱/۰۴

بررسی و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه ترکمنچای با استفاده از مقادیر میانگین انحراف مطلق، ریشه میانگین مربع خطا و ضریب همبستگی، نشان داد که از بین روش‌های مختلف موردبررسی، روش کوکریجینگ در پهنه‌بندی تمام شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی در منطقه ترکمنچای بهترین عملکرد را داشته است. ریزو و موزر نیز روش کوکریجینگ را به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی شامل کلر، سدیم، سولفات، کلسیم و شوری معرفی کردند (Rizzo & Mouser, 2000). در شکل ۱، توزیع مکانی شاخص‌های کیفی آب در منطقه ترکمنچای ارائه شده است.


Mg (Meq/l)
(بسیار کم) ۰.۴ – ۱.۱
(کم) ۱.۲ – ۱.۴
(متوسط) ۱.۵ – ۱.۶
(زیاد) ۱.۷ – ۲.۰
(بسیار زیاد) ۲.۱ – ۴.۱
Ca (Meq/l)
(بسیار کم) ۰.۶ – ۱.۷
(کم) ۱.۸ – ۲.۱
(متوسط) ۲.۲ – ۲.۶
(زیاد) ۲.۷ – ۳.۳
(بسیار زیاد) ۳.۴ – ۸.۵
Cl (Meq/l)
(بسیار کم) ۰.۲ – ۰.۵
(کم) ۰.۶ – ۰.۸
(متوسط) ۰.۹ – ۱.۲
(زیاد) ۱.۳ – ۱.۹
(بسیار زیاد) ۲.۰ – ۷.۸
Na (Meq/l)
(بسیار کم) ۰.۱ – ۱.۲
(کم) ۱.۳ – ۲.۱
(متوسط) ۲.۲ – ۲.۹
(زیاد) ۳.۰ – ۳.۷
(بسیار زیاد) ۳.۸ – ۱۳.۵
چاه مشاهده ای
شهر ترکمنچای
روستا
Kilometers
0 1 2 4 6 8
ترکمنچای
یالقوزآغاج
ورزقان
بالسین شریف اباد
دستجرد
اوشنار
جیران بلاغی
خواجه غیاث
700000
710000
720000
4172000
4166000
4160000
4154000
N
W
E
S



شکل ۱- توزیع مکانی شاخص‌های کیفی آب در منطقه ترکمنچای

پارامتر هدایت الکتریکی (EC)

نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی هدایت الکتریکی در جدول ۲ ارائه شده است. بر مبنای ارزیابی متقابل، مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Pentaspherical و پارامتر کمکی TDS به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی EC معرفی شد (جدول ۲). به‌طورکلی، میزان EC از سمت شمال به جنوب محدوده موردمطالعه افزایش می‌یابد (شکل ۱). همچنین مطابق با معیار طبقه‌بندی ویلکوکس برای مصارف کشاورزی، بخش عظیمی از منابع آب‌های زیرزمینی در محدوده موردبررسی در طبقه خوب قرار دارند که برای مصارف کشاورزی مناسب هستند و هیچ‌گونه محدودیتی از نظر پراکنش EC برای مصارف کشاورزی وجود ندارد. پس از روش کوکریجینگ که با مقادیر ضریب همبستگی ۹۰ درصد، RMSE معادل ۱۳۰/۶۷ میکرو موس بر سانتی‌متر و MAD معادل ۱۰۰/۸۷ میکرو موس بر سانتی-متر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی هدایت الکتریکی معرفی شد، روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و کریجینگ بیزی تجربی قرار گرفتند که تقریباً دقت یکسانی دارند (جدول ۲). رابینسون و همکاران به بررسی عملکرد چهار روش کریجینگ، کوکریجینگ، فاصله معکوس وزنی و اسپلاین در تعیین خصوصیات خاک پرداختند. ایشان گزارش نمودند که روش‌های زمین‌آمار توانایی ارائه نقشه‌های پیوسته خصوصیات خاک را دارا بوده و از میان روش‌های موردبررسی، روش کوکریجینگ در تخمین هدایت الکتریکی به‌عنوان برترین روش معرفی شد (Robinson et al., 2005).

جدول ۲- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی هدایت الکتریکی

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۱۴۱/۹۱	۲۰۱/۳۲	۰/۷۳
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۱۵۳/۲۹	۲۱۵/۴۰	۰/۶۸
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام K-Bessel	۱۴۳/۷۰	۲۰۲/۹۹	۰/۷۳
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام K-Bessel	۱۴۲/۲۵	۱۹۸/۶۸	۰/۷۴
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Pentaspherical پارامتر کمکی: TDS	۱۰۰/۸۷	۱۳۰/۶۷	۰/۹۰
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۴/۰۲	۱۴۹/۱۲	۲۰۴/۴۲	۰/۷۳
توابع پایه شعاعی	کرنل: اسپیلاین با تابع کششی	۱۴۸/۸۲	۲۱۱/۵۲	۰/۶۹

پارامتر غلظت کل املاح (TDS)

در جدول ۳، نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی غلظت کل املاح ارائه گردیده است که بر اساس آن مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Rational Quadratic و پارامتر کمکی EC، به‌عنوان مدل بهینه پهنه‌بندی معرفی شد. پهنه‌بندی تغییرات TDS حاکی از توزیع نسبتاً یکنواخت این پارامتر در محدوده مطالعاتی است. به‌طوری‌که به‌غیر از محدوده روستای خواجه غیاث، در سایر قسمت‌ها میزان TDS در محدوده بسیار کم و کم قرار دارد (شکل ۱). همچنین از نظر طبقه‌بندی برای مصرف شرب بر مبنای دیاگرام شولر، کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه خوب است. فقط در محدوده روستای خواجه غیاث مقدار TDS بیشتر است اما باز هم از نظر شرب در وضعیت قابل‌قبول قرار دارد. پس از روش کوکریجینگ که با مقادیر ضریب همبستگی ۹۱ درصد، RMSE معادل ۶۱/۱۳ میلی‌گرم بر لیتر و MAD معادل ۴۶/۶۴ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی غلظت کل املاح معرفی شد، روش کریجینگ بیزی تجربی در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۳). در مطالعات متعددی کارایی بهتر روش کوکریجینگ را در پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی منابع آب‌های زیرزمینی گزارش شده است (محمدی و همکاران، ۱۳۸۶؛ تقی‌زاده مهرجردی و همکاران، ۱۳۸۷؛ دهقانی و نورعلیئی، ۱۳۹۵).

جدول ۳- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی غلظت کل املاح

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام Hole Effect	۷۵/۳۸	۱۰۳/۲۴	۰/۷۰
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام Exponentioal	۷۶/۸۱	۱۱۰/۳۹	۰/۶۴
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام Rational Quadric	۷۲/۸۹	۱۰۱/۴۸	۰/۷۲
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام Whittle	۷۰/۶۶	۹۷/۵۰	۰/۷۴
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Rational Quadratic پارامتر کمکی: EC	۴۶/۶۴	۶۱/۱۳	۰/۹۱
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۲/۸۱	۷۲/۳۹	۱۰۱/۴۷	۰/۷۱
توابع پایه شعاعی	کرنل: اسپیلاین با تابع کششی	۷۴/۶۶	۱۰۴/۹۰	۰/۶۸

پارامتر کلسیم (Ca)

نتایج حاصل از ارزیابی متقابل انواع روش‌های پهنه‌بندی کلسیم نشان داد که مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Exponential و پارامتر کمکی EC، مدل بهینه را برای پهنه‌بندی غلظت Ca ارائه داد (جدول ۴). بیشترین غلظت کلسیم در محدوده روستای خواجه غیاث وجود دارد. به‌طورکلی همانند سایر پارامترهای موردبررسی، میزان غلظت کلسیم در نیمه شمالی محدوده موردمطالعه کمتر از نیمه جنوبی است (شکل ۱). نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی غلظت کلسیم در محدوده موردمطالعه نشان داد که پس از روش کوکریجینگ که با مقادیر ضریب همبستگی ۷۸ درصد، RMSE معادل ۰/۸۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و MAD معادل ۰/۶۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی غلظت کلسیم معرفی شد، روش‌های کریجینگ ساده و کریجینگ بیزی تجربی با دقت نزدیک به هم در رتبه بعدی قرار گرفت (جدول ۴). بین سایر روش‌های پهنه‌بندی غلظت کلسیم نیز تفاوت مشهودی مشاهده نشد (جدول ۴). در مطالعه نفوتی و امامی‌میبدی (۱۳۹۷) روش کوکریجینگ بهترین روش در برآورد میزان کلسیم معرفی شد.

جدول ٤- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی کلسیم

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام Rational Quadric	۰/۶۹	۰/۹۳	۰/۶۹
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام Gaussian	۰/۶۹	۰/۹۳	۰/۶۹
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام Rational Quadric	۰/۶۷	۰/۹۰	۰/۷۳
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام Whittle	۰/۶۶	۰/۸۹	۰/۷۴
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Exponential پارامتر کمکی: EC	۰/۶۱	۰/۸۴	۰/۷۸
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۱/۶۶	۰/۶۸	۰/۹۳	۰/۶۹
توابع پایه شعاعی	کرنل: اسپیلاین کاملاً منظم	۰/۶۹	۰/۹۳	۰/۶۹

پارامتر منیزیم (Mg)

نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی منیزیم در جدول ۵ ارائه شده است. بر این اساس، مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Pentaspherical و پارامتر کمکی TDS به‌عنوان مدل بهینه برای ارائه توزیع مکانی غلظت Mg معرفی شد. نحوه تغییرات مکانی غلظت منیزیم در نیمه شرقی محدوده (به‌جز محدوده روستای خواجه غیاث) کمتر از نیمه غربی می‌باشد (شکل ۱). پس از روش کوکریجینگ که بر مبنای روش ارزیابی متقابل با مقادیر ضریب همبستگی ۷۶ درصد، RMSE معادل ۰/۵۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و MAD معادل ۰/۳۹ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی غلظت منیزیم معرفی شد، روش کریجینگ بیزی تجربی در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۵). در مطالعه نفوتی و امامی‌میبدی (۱۳۹۷) روش کوکریجینگ بهترین روش در برآورد میزان منیزیوم معرفی شد.

جدول ٥- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی منیزیم

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۰/۴۵	۰/۶۰	۰/۶۳
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۶۶
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام Rational Quadric	۰/۴۵	۰/۶۰	۰/۶۳
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام Exponential Detrended	۰/۴۴	۰/۵۸	۰/۶۸
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Pentaspherical پارامتر کمکی: TDS	۰/۳۹	۰/۵۳	۰/۷۶
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۱/۳۰	۰/۴۶	۰/۶۰	۰/۶۱
توابع پایه شعاعی	کرنل: اسپیلاین با تابع کششی	۰/۴۶	۰/۶۰	۰/۶۳

پارامتر سدیم (Na)

مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Exponential و پارامتر کمکی SAR، بهترین توزیع مکانی را برای غلظت سدیم ارائه داد (جدول ۶). همچنین همانند اغلب پارامترهای موردبررسی، نحوه تغییر غلظت سدیم نیز از شمال به جنوب افزایش داشت و بیشترین مقدار در محدوده روستای خواجه غیاث حاصل گردید (شکل ۱). از نظر معیارهای شرب نیز غلظت سدیم در وضعیت خوب تا متوسط قرار دارد. نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی غلظت سدیم در محدوده موردمطالعه نشان داد که پس از روش کوکریجینگ که با مقادیر ضریب همبستگی ۸۵ درصد، RMSE معادل ۰/۶۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و MAD معادل ۰/۴۶ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی غلظت سدیم معرفی شد، روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ بیزی تجربی و توابع پایه شعاعی با دقت نزدیک به هم در رتبه بعدی قرار گرفتند (جدول ۶). عبدالرحمان و همکاران در مطالعه خود روش فاصله معکوس زمانی را بهترین روش در برآورد سدیم معرفی کردند که با نتایج این مطالعه مغایرت دارد (AbdelRahman et al., 2021).

جدول ٦- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی سدیم

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام Hole Effect	۰/۵۸	۰/۷۶	۰/۷۷
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام Gaussian	۰/۵۹	۰/۸۷	۰/۷۰
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۰/۶۳	۰/۹۱	۰/۶۶
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام K-Bessel Detrended	۰/۵۵	۰/۷۶	۰/۷۷
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Exponential پارامتر کمکی: SAR	۰/۴۶	۰/۶۳	۰/۸۵
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۴/۲۶	۰/۶۴	۰/۸۵	۰/۷۱
توابع پایه شعاعی	کرنل: اسپیلاین با تابع کششی	۰/۵۸	۰/۷۶	۰/۷۷

پارامتر کلر (Cl)

نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی نشان داد که مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Exponential و پارامتر کمکی TDS، بهترین توزیع مکانی را برای غلظت کلر ارائه می‌کند (جدول ۷). نقشه پراکنش مکانی غلظت کلر بسیار شبیه به نقشه توزیع هدایت الکتریکی حاصل شده است (شکل ۱). مقایسه غلظت کلر با مقادیر کلاس‌بندی شده توسط شولر حاکی از وضعیت مطلوب غلظت کلر در آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی از نظر مصرف شرب است که تقریباً در کل محدوده در وضعیت خوب قرار دارد. پس از روش کوکریجینگ که بر مبنای روش ارزیابی متقابل با مقادیر ضریب همبستگی ۷۴ درصد، RMSE معادل ۰/۴۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و MAD معادل ۰/۳۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی غلظت کلر معرفی شد، روش توابع پایه شعاعی در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۷). تقی‌زاده مهرجردی در بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از سه روش فاصله معکوس وزنی، کریجینگ و کوکریجینگ گزارش کرد که روش فاصله معکوس وزنی نتایج بهتری را در برآورد کلر ارائه می‌کند. به‌طورکلی روش مناسب زمین‌آماری در برآورد یک متغیر، علاوه بر نوع متغیر، به عوامل منطقه‌ای و محیطی تأثیرگذار بر آن متغیر بستگی داشته و به‌طورکلی، نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه برای یک متغیر را به همه مناطق تعمیم داد(Taghizadeh-Mehrjardi, 2014).

جدول ۷- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی کلر

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام Hole Effect	۰/۳۹	۰/۴۹	۰/۶۰
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام Rational Quadric	۰/۳۸	۰/۴۹	۰/۶۱
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام Rational Quadric	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۵۰
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام Whittle Detrended	۰/۳۹	۰/۵۰	۰/۵۸
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Exponential پارامتر کمکی: TDS	۰/۳۲	۰/۴۱	۰/۷۴
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۲	۰/۳۹	۰/۵۰	۰/۵۸
توابع پایه شعاعی	کرنل: تابع مالتی‌کوادریک	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۶۴

پارامتر سولفات (SO_4)

مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Exponential و پارامتر کمکی EC، به‌عنوان بهترین روش توزیع مکانی غلظت SO_4 در منطقه معرفی شد (جدول ۸). غلظت سولفات از نیمه شمالی به سمت نیمه جنوبی محدوده موردمطالعه افزایش داشته است (شکل ۱). بااین‌حال از نظر شاخص شولر در کل محدوده وضعیت آب‌های زیرزمینی برای مصرف شرب در وضعیت خوب و قابل‌قبول قرار دارد. پس از روش کوکریجینگ که با مقادیر ضریب همبستگی ۷۴ درصد، RMSE معادل ۰/۵۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و MAD معادل ۰/۴۶ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی غلظت سولفات معرفی شد، روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ بیزی تجربی با دقت نزدیک به هم در رتبه بعدی قرار گرفتند (جدول ۸). در مطالعه‌ای که توسط تقی‌زاده مهرجردی صورت گرفت روش کریجینگ بهترین روش در برآورد میزان سولفات معرفی‌شده که با در مطالعه حاضر روش کریجینگ پس از روش کوکریجینگ در اولویت-های دوم و سوم در برآورد میزان سولفات گزارش شدند (Taghizadeh-Mehrjardi, 2014).

جدول ۸- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی سولفات

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام Hole Effect	۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۶۵
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۰/۵۹	۰/۶۸	۰/۶۲
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۶۲
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام Exponential Detrended	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۶۴
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Exponential پارامتر کمکی: EC	۰/۴۶	۰/۵۸	۰/۷۴
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۱	۰/۵۹	۰/۷۱	۰/۵۷
توابع پایه شعاعی	کرنل: اسپیلاین با تابع کششی	۰/۵۷	۰/۷۰	۰/۵۹

پارامتر نسبت جذبی سدیم (SAR)

مدل کوکریجینگ با واریوگرام بهینه Exponential و پارامتر کمکی Na، بهترین پراکنش مکانی را برای میزان نسبت جذبی سدیم ارائه داد (جدول ۹). بر این اساس، پراکنش این شاخص در محدوده مطالعاتی تقریباً یکنواخت بوده؛ به‌طوری‌که در نیمه شمالی منطقه میزان نسبت جذبی سدیم در محدوده بسیار کم قرار داشته و در بخش بزرگی از جنوب منطقه نیز در محدوده کم و متوسط می‌باشد (شکل ۱). از نظر مصارف کشاورزی نیز در کل منطقه میزان نسبت جذبی سدیم برای مصارف کشاورزی در محدوده طبقه‌بندی عالی قرار دارد و از این نظر هیچ‌گونه محدودیتی وجود ندارد. پس از روش کوکریجینگ که بر مبنای روش ارزیابی متقابل با مقادیر ضریب همبستگی ۸۰ درصد، RMSE معادل ۰/۳۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و MAD معادل ۰/۲۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی نسبت جذبی سدیم معرفی شد، روش‌های کریجینگ عمومی و کریجینگ بیزی تجربی در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۹). تقی‌زاده مهرجردی به تجزیه‌وتحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از سه روش میانیابی فاصله معکوس وزنی، کریجینگ و کوکریجینگ پرداخت. نتایج نشان داد که روش کوکریجینگ برای نسبت جذبی سدیم نتایج بهتری را در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه داده که با نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه مطابقت داشته و نشان‌دهنده دقت بالای روش کوکریجینگ در برآورد پارامتر نسبت جذبی سدیم است (Taghizadeh-Mehrjardi, 2014).

جدول ۹- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های پهنه‌بندی نسبت جذبی سدیم

روش	توضیحات مدل بهینه	MAD	RMSE	R
کریجینگ معمولی	سمی‌واریوگرام Gaussian	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۵۹
کریجینگ عمومی	سمی‌واریوگرام Hole Effect	۰/۳۵	۰/۴۶	۰/۶۱
کریجینگ ساده	سمی‌واریوگرام J-Bessel	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۵۳
کریجینگ بیزی تجربی	سمی‌واریوگرام K-Bessel Detrended	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۶۳
کوکریجینگ	سمی‌واریوگرام: Exponential پارامتر کمکی: Na	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۸۰
مدل عکس فاصله وزن‌دار	توان ۱	۰/۳۶	۰/۵۰	۰/۵۱
توابع پایه شعاعی	کرنل: اسپیلاین با تابع کششی	۰/۳۶	۰/۵۱	۰/۴۸

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پراکنش مکانی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه ترکمنچای موردبررسی قرار گرفت. برای ارائه بهترین نقشه‌های پهنه‌بندی از روش ارزیابی متقابل استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه شاخص‌های خطای موردبررسی، روش کوکریجینگ به‌عنوان بهترین روش پهنه‌بندی برای تمام شاخص‌های موردمطالعه معرفی شد. ارزیابی نتایج حاصل از پراکنش مکانی شاخص‌ها نشان داد که منابع آب‌های زیرزمینی در کل منطقه موردمطالعه وضعیت مطلوبی جهت استفاده برای مصارف مختلف دارد. بااین‌حال نیمه شمالی محدوده مطالعاتی از نظر غلظت عناصر و مقادیر شاخص‌ها به‌منظور استفاده برای مصارف مختلف از جمله شرب و کشاورزی وضعیت مطلوب‌تری نسبت به نیمه جنوبی دارد. همچنین با توجه به روند تغییرات غلظت عناصر در محدوده روستای

خواجه غیاث، به‌منظور بهبود شرایط و ارائه سیاست‌های برداشت و مصرف از آب‌های زیرزمینی با هدف جلوگیری از افت کیفیت آب توصیه می‌شود پایش کیفی آب به‌صورت منظم انجام شود.

منابع

اژدری، ز. و حسینی، س. ز. ۱۳۹۷. تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت سگزی، اصفهان). نشریه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۱۹(۳):۸۰-۶۳.

پورخباز، ح.ر.، اقدر، ح. و محمدیاری، ف. ۱۳۹۶. پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی بر اساس طبقه‌بندی ویلکوکس (مطالعه موردی: دشت قزوین). فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی. ۱۷(۵۸):۱۲۹-۱۱۱.

تقی‌زاده مهرجردی، ر.، زارعیان جهرمی، م.، محمودی، ش.، حیدری، ا. و سرمدیان، ف. ۱۳۸۷. بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۲(۵): ۷۰-۶۳.

دهقانی، ر. و نورعلیئی، ع. ۱۳۹۵. مقایسه روش‌های زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی در تخمین سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت نورآباد، استان لرستان). نشریه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۱۸(۱):۴۳-۳۱.

قهرمان، ب.، حسینی، م. و عسگری، ح. ۱۳۸۲. کاربرد زمین‌آمار در ارزیابی شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۱۴(۵۵): ۹۸۱-۹۷۱.

قهرودی‌تالی، م. ۱۳۸۱. ارزیابی درون‌یابی به روش کریجینگ. نشریه پژوهش‌های جغرافیایی. ۴۳: ۱۰۸-۹۵.

کاشی زنوزی، ل.، یزدانی، م.ر.، خسروشاهی، م. و رحیمی، م. ۱۳۹۷. بررسی تغییرات برخی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی به روش زمین‌آمار در حوزه آبخیز شهرستان مرند- آذربایجان شرقی. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۲(۶): ۱۰۹۵-۱۰۸۱.

محمدی، ص.، سلاجقه، ع.، مهدوی، م. و باقری، ر. ۱۳۸۶. مقایسه برخی از روش‌های زمین‌آماری در بررسی تغییرات مکانی غلظت املاح محلول آب زیرزمینی دشت کرمان. نخستین همایش منطقه‌ای آب‌های زیرزمینی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان، ایران.

محمدی، ص.، سلاجقه، ع.، مهدوی، م. و باقری، ر. ۱۳۹۱. بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از روش زمین‌آماری مناسب (طی یک دوره آماری ۱۰ ساله، ۱۳۷۵-۱۳۸۵). نشریه تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۱۹(۱): ۷۱-۶۰.

مهدیان، م. ۱۳۸۵. کاربرد زمین‌آمار در خاکشناسی. کارگاه آموزشی کاربرد زمین‌آمار در خاکشناسی. اولین همایش خاک، توسعه پایدار و محیط‌زیست، دانشگاه تهران.

نفوتی، م.ج. و امامی میبدی، ا. ۱۳۹۷. تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت مروست. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۰(۱): ۱۳۲-۱۲۱.

AbdelRahman, M.A.E., Zakarya, Y.M., Metwaly, M.M. and Koubouris, G. 2021. Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. Sustainability. 13(194).

Davis, B.M. 1987. Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. Mathematical Geosciences. 19: 241-248.

Munoz-Najera, M.A., Tapia-Silva, F.O., Barrera-Escorcia, G. and Ramirez-Romero, P. 2020. Statistical and geostatistical spatial and temporal variability of physicochemical parameters, nutrients, and contaminants in the Tenango Dam, Puebla, Mexico. Geochemical Exploration. 209(106435).

Robinson, S., Sandstrom, S.M., Denenberg, V.H. and Palmiter, R.D. 2005. Distinguishing whether dopamine regulates liking, wanting, and/or learning about rewards. Behavioral Neuroscience. 119: 5–15.

Rizzo, D.M. and Mouser, J.M. 2000. Evaluation of Geostatistics for Combined Hydrochemistry and Microbial Community Fingerprinting at a Waste Disposal Site. pp. 1-11.

Taghizadeh-Mehrjardi, R. 2014. Mapping the Spatial Variability of Groundwater Quality in Urmia, Iran. Materials and Environmental Science. 5(2):530-539.

Seyedmohammadi, J. & Matinfar, H.R. 2018. Statistical and geostatistical techniques for geospatial modeling of soil cation exchange capacity. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 49(18): 2301-2314.

Zou, J. and Osborne, B. 2021. Spatially related sampling uncertainty in the assessment of labile soil carbon and nitrogen in an Irish forest plantation. Applied Sciences. 11(2139).

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 16, Apr.-May. 2022, p. 83-94

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۶، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۱، ص. ۹۴-۸۳

Evaluation of Mapping Methods in Spatial Distribution of Groundwater Quality Indicators (Case Study: Turkmenchay Region)

H. Tarkian ivaragi[1], N. Nazari[*,2] , A. Faramarzi[3], A. Khani[4]
Recived: Sep.18, 2021 Accepted: Oct.13, 2021

Abstract

Spatial variations in the qualitative indicators of groundwater resources are among the factors influencing the policies of harvest management and consumption of these resources. In arid and semi-arid climatic zones, groundwater is one of the important resources for exploitation for various purposes, especially agriculture and drinking and importance study of its quality indicators in order to assess the possibility of using water resources. In this research, the accuracy of kriging and cokriging statistical methods as well as definite inverse weighted distance methods and radial base functions to predict the spatial distribution of groundwater quality parameters including chlorine, sodium, magnesium, calcium Sulfate, sodium adsorption ratio, total solute concentration and electrical conductivity were investigated in Turkmenchay region. In order to evaluate the results, cross-evaluation method and MAD, RMSE and R indices were used. Based on the obtained results, the cokriging method is the best method for zoning all the studied indicators. RMSE values for electrical conductivity are 130.67 μmohs/cm, total solute concentration is 61.13 mg/lit, calcium concentration is 0.84 meq/lit, magnesium concentration is 0.53 mg/lit, sodium concentration equal to 0.63 meq/lit, chlorine concentration equal to 0.41 meq/lit, sulfate concentration equal to 0.58 meq/lit and Sodium absorption ratio was obtained as 0.31 meq/lit were reported. Also, the evaluation of the results obtained from the spatial distribution of indicators showed that the groundwater resources in the whole study area are in a favorable condition for use for various purposes, which is more evident in the northern half of the study area. Due to the trend of changes in the concentration of elements in the area of Khajeh Ghias village, in order to improve the conditions and provide policies for extraction and consumption of groundwater in order to prevent a decline in water quality, it is recommended to monitor water quality regularly.

Keywords: Co-kriging, Cross-evaluation method, Geostatistics, Khajeh Ghias village, Kriging

1- PhD Student in Soil Chemistry and Fertility, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran
2- Assistant Professor, Department of Soil Chemistry and Fertility, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran
3- Assistant Professor, Department of Agronomy, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran
4- Assistant Professor, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran
(*- Corresponding Author Email: Nas.Nazari@Gmail.com)