Research Paper

Modeling Mroundwater Quality Parameters Using Geostatistical Models in Markazi Province

Mojde Minaei[1], Hossein Aghamohammadi[2*], Mohammad H. Vahidnia[3], Amin R. Neshat[4], Saeed Behzadi[5]

[1]PhD Student at Department of Natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. mojde.minaei@gmail.com
[2] Assistant Professor at Department of Natural resources and environment and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. hossein.aghamohammadi@gmail.com
[3] Assistant Professor at Center for Remote Sensing and GIS Research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. mh_vahidnia@sbu.ac.ir
[4] Assistant Professor at Department of Natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. neshat.aminreza@gmail.com.
[5] Associate Professor, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. s_behzadi@sbu.ac.ir

10.22125/iwe.2025.544540.1896

Received:
July 26, 2025
Accepted:
November 3, 2025
Available online:
December 25, 2025

Keywords:
groundwater quality, universal kriging, TDS, sulfate, sodium.

Abstract

Population growth, industrial development, and rising living standards have increased water needs in Iran. Assessing the quality of this vital resource, especially in the Markazi Province, is of particular importance. Traditional evaluation methods are costly and time-consuming; therefore, applying mathematical approaches for mapping and predicting water quality is essential. In this study, the spatial and temporal changes of three key parameters (TDS, sulfate, and sodium) in Markazi Province were analyzed for the years 2017–2018, 2020–2021, and 2023–2024. These parameters, due to their impact on salinity and hardness, play a crucial role in assessing usability. Samples used in this research were obtained from the Markazi Water and Wastewater Company Laboratory. For spatial modeling, ordinary kriging with three semi-variogram models—exponential, Gaussian, and spherical—was tested, and model accuracy was evaluated using RMSE, MAE, and R^2. Results showed that the Gaussian model outperformed the others in predicting all three parameters across all studied years. The rising mean values of all three parameters in 2019 indicate higher concentrations in some samples that year; however, produced maps indicate a broad decline in water quality in 2024.

[*] **Corresponding Author:** Hossein Aghamohammadi
Address: Assistant Professor at Department of Natural resources and environment and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: hossein.aghamohammadi@gmail.com
Tel: 09126134918

1. Introduction

Groundwater, as one of the main sources of water supply in arid and semi-arid regions, plays a vital role in sustainable economic and social development. This important and vital resource has faced numerous threats in recent decades, including declining water levels, increasing salinity, and anthropogenic pollution.

Groundwater quality assessment is one of the research and management priorities in the field of water resources. Among the various indicators, three parameters, TDS, SO_4^{2-}, and Na^+, are of particular importance due to their direct impact on salinity, hardness, and consumer health.

Geostatistical methods, as powerful tools in spatial data analysis, have the ability to accurately model the spatial structure of continuous phenomena such as groundwater quality. Among these methods, global kriging, considering spatial trends, is more suitable for analyzing data dependent on geographical coordinates.

The main objective of this study is to accurately assess the spatial structure of TDS, sulfate, and sodium quality parameters in Markazi Province, determine the best semivariogram model for each parameter, and analyze temporal trends in the quality of groundwater resources in the region.

Several previous studies on groundwater quality in Iran and other countries have been conducted using geostatistics. However, many of these studies have either examined only one parameter, were limited to a specific year, or did not have a temporal analysis approach. The innovation of this research in simultaneously analyzing three main water quality parameters, in three periods with a total interval of 6 years (2017, 2019, and 2023), with the aim of monitoring temporal and spatial trends and comparing the performance of different kriging models, distinguishes it from other studies.

The groundwater resources of this region have come under great pressure in recent years. Population growth, industrial development, extensive agriculture, and excessive use of deep and semi-deep wells have caused a significant drop in the water table in many parts of the plain. Also, numerous evidences of increased concentrations of pollutants such as TDS, sodium, and sulfate have been reported in the regional aquifer, which doubles the necessity of continuous monitoring and spatial modeling of the quality of groundwater resources. This research attempts to help better understand this situation by using advanced geostatistical methods.

2. Materials and Methods

To conduct this research, qualitative data related to three parameters of TDS, SO_4^2, and Na^+ in groundwater were extracted from observation wells in the Central Province during three periods in 2017, 2020, and 2023. For spatial modeling of qualitative parameters, the global kriging method was used. The reason for choosing this method was the presence of spatial trends in the parameters studied. Global kriging is more accurate than ordinary kriging in situations where the average parameters are not constant across the region. In this study, three different semi-virogram models, exponential, spherical, and Gaussian, were used to model the spatial structure of the data. The model with the lowest RMSE and MAE and the highest R^2 was selected as the best model and the final map was drawn based on it.

3. Results

In this study, modeling was performed using the global kriging method and three types of semi-variogram models (exponential, Gaussian, and spherical), and the accuracy of the models was compared based on RMSE, MAE, and R^2 indices.

In all three years of the study, the exponential model showed the best performance for the TDS parameter.

The results show that TDS values increased in 1402 compared to previous years, which could be due to reduced aquifer recharge, high evaporation, and increased use of chemical fertilizers and the entry of sewage into underground sources.

For the sulfate parameter, the Gaussian model performed better than the other models in all three years. It shows that the spatial distribution of sulfate has a smoother and more continuous structure, which is more consistent with the nature of the Gaussian model. The gradual increase in sulfate values could also be due to increased industrial activities, saline drainage, or greater dissolution of evaporite rocks in the region.

The sodium parameter, similar to TDS, had the best fit with the exponential model in all years. An increase in RMSE value is also observed in 1402, which is probably due to increased discharge of agricultural wells and reduced freshwater infiltration into the groundwater aquifer.

Spatial prediction maps generated through the global kriging method in the ArcGIS software environment represent the spatial distribution of groundwater quality parameter concentrations in this area. The conclusion of this section shows that the exponential model performed better for TDS and sodium parameters in all years, but the Gaussian model was the most appropriate model for modeling sulfate. In addition, the prediction accuracy in 1399 was higher than the other two years, and the errors increased in 1402, and in general, the quality trend of groundwater resources in the Arak Plain indicates a relative decline in quality in 1402.

4. Discussion and Conclusion

The results of this study showed that the use of geostatistical methods, especially global kriging, is an effective method for spatial modeling of groundwater quality parameters in Markazi Province and can provide a better understanding of the spatial distribution and temporal trends of water quality changes. This research showed that geostatistical methods are not only a scientific tool for better understanding the status of groundwater quality, but can also be used as an effective decision-making tool for water resources managers in planning, monitoring, and controlling water pollution. Repeating the study in future time periods to analyze long-term trends in quality changes can help to better understand the region and provide management solutions. In addition, continuous updating of water resource quality databases and conducting supplementary studies by adding other parameters such as nitrate, chloride, or heavy metals can give decision-makers a more comprehensive view of groundwater quality.

5. Six important references

1) Tarkian Ivaragi, H., et al., Evaluation of mapping methods in spatial distribution of groundwater quality indicators (Case study: Turkmenchay region). 2022. 16(1): p. 83-94.

2) Bourotte, C., et al., Natural occurrence of hexavalent chromium in a sedimentary aquifer in Urânia, State of São Paulo, Brazil. 2009. 81: p. 227-242.

3) Ahmadi, S.H., A.J.E.m. Sedghamiz, and assessment, Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. 2007. 129: p. 277-294.

4) Goovaerts, P., Geostatistics for natural resources evaluation. 1997: Oxford university press.

5) Talebi, M.S., M.J.J.o.A.R.i.W. Fatemi, and Wastewater, Assessment of the quality and quantity of groundwater in Bahadoran plain using neural network methods, geostatistical and multivariate statistical analysis. 2020. 7(2): p. 144-151.

6) Zaresefat, M., Derakhshani, R., & Griffioen, J. J. W. (2024). Empirical Bayesian Kriging, a robust method for spatial data interpolation of a large groundwater quality dataset from the Western Netherlands. 16(18), 2581.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدلسازی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از مدل های زمین آمار در استان مرکزی

مژده مینائی[۱]، حسین آقامحمدی[۲]✉، محمدحسن وحیدنیا[۳]، امین رضا نشاط[۴]، سعید بهزادی[۵]

تاریخ ارسال:۱۴۰۴/۰۵/۰۴
تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۰۸/۱۲

مقاله پژوهشی

چکیده

رشد جمعیت، توسعه صنعتی و افزایش استانداردهای زندگی باعث افزایش نیازهای آبی در ایران شده است. بررسی کیفیت این منبع حیاتی، به‌ویژه در استان مرکزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های سنتی ارزیابی، هزینه‌بر و زمان‌بر هستند؛ بنابراین استفاده از روش‌های ریاضی برای نقشه‌برداری و پیش‌بینی کیفیت آب ضروری است. در این مطالعه، تغییرات مکانی و زمانی سه پارامتر مهم (TDS، سولفات و سدیم) در استان مرکزی در سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ تحلیل شد. این پارامترها به‌دلیل تأثیرشان بر شوری و سختی آب، نقش مهمی در ارزیابی قابلیت استفاده دارند. نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش از آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی دریافت شد برای مدلسازی مکانی، روش کریجینگ جهانی با سه مدل نیم‌واریوگرام نمایی، گوسی و کروی آزموده شد و دقت مدل‌ها با شاخص‌های RMSE ، MAE و R^2 ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که مدل گوسی در پیش‌بینی هر سه پارامتردر تمامی سال‌های مورد مطالعه بهتر عمل کرده است. بالا رفتن مقدار میانگین هر سه پارامتر در سال ۱۳۹۹ نشان از بالا رفتن مقدار غلظت برخی نمونه‌ها در این سال دارد اما بررسی نقشه‌های تولید شده حاکی از پایین آمدن افت کیفی گسترده در منطقه در سال ۱۴۰۲ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کیفیت آب زیرزمینی، کریجینگ جهانی، کل جامدات محلول، سولفات، سدیم.

[۱] دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: mojde.minaei@gmail.com

[۲] استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: hossein.aghamohammadi@gmail.com

[۳] استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: mh_vahidnia@sbu.ac.ir

[۴] استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: neshat.aminreza@gmail.com.

[۵] دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_behzadi@sbu.ac.ir

مقدمه

آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش حیاتی در توسعه پایدار اقتصادی و اجتماعی ایفا می‌کند. این منبع مهم و حیاتی در دهه‌های اخیر با تهدیدهای متعددی از جمله افت سطح آب، شوری فزاینده و آلودگی‌های انسانی مواجه شده است. در بسیاری از مناطق ایران، خصوصاً در استان مرکزی، منابع آب زیرزمینی نه‌تنها تأمین‌کننده آب شرب شهرها و روستاها، بلکه پایه‌ای برای کشاورزی و صنایع محلی نیز به شمار می‌رود. استان مرکزی به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی، صنعتی و زیست‌محیطی کشور، به‌شدت وابسته به منابع آب زیرزمینی است؛ با این حال، فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی، برداشت بی‌رویه، خشکسالی‌های مکرر و آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی سبب کاهش کمّی و کیفی این منابع در سال‌های اخیر شده است (Tarkian Ivaragi, NAZARI, Faramarzi, Khani, & Drainage, 2022).

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، یکی از اولویت‌های پژوهشی و مدیریتی در حوزه منابع آب است. از میان شاخص‌های مختلف، سه پارامتر کل جامدات محلول (TDS)، سولفات (SO_4^{2-}) و سدیم (Na^+) به‌دلیل تأثیر مستقیم بر شوری، سختی و سلامت مصرف‌کنندگان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. بالا بودن TDS نشان‌دهنده شوری و کاهش کیفیت کلی آب است؛ سولفات می‌تواند موجب مشکلات گوارشی در انسان و خوردگی در زیرساخت‌ها شود؛ و سدیم بالا خطراتی برای سلامت افراد با بیماری‌های کلیوی و فشار خون بالا به همراه دارد (Bourotte, Bertolo, Almodovar, & Hirata, 2009). ازاین‌رو، تحلیل مکانی و زمانی این مؤلفه‌ها برای مدیریت منابع آبی منطقه‌ای حیاتی است و شناسایی الگوهای پراکنش مکانی این مؤلفه‌ها به‌منظور تدوین سیاست‌های مدیریتی صحیح، اهمیت بسزایی دارد.

با توجه به ماهیت فضایی داده‌های کیفی آب، استفاده از ابزارهای تحلیل مکانی مانند زمین‌آمار ضروری است. روش‌های زمین‌آماری به‌عنوان ابزارهای قدرتمند در تحلیل داده‌های فضایی، قابلیت مدل‌سازی دقیق ساختار مکانی پدیده‌های پیوسته نظیر کیفیت آب زیرزمینی را دارند. در میان این روش‌ها، کریجینگ جهانی[1] با لحاظ روندهای مکانی[2]، برای تحلیل داده‌های وابسته به مختصات جغرافیایی مناسب‌تر عمل می‌کند (Ahmadi, Sedghamiz, & assessment, 2007; Goovaerts, 1997).

نیم‌واریوگرام‌ها به‌عنوان پایه اصلی عملکرد مدل کریجینگ، برای مدلسازی ساختار مکانی داده‌ها به کار می‌روند. در این مطالعه، سه مدل پرکاربرد نیم‌واریوگرام شامل نمایی[3] ، گوسی[4] و کروی[5] به‌کار گرفته شده‌اند که هر یک ویژگی‌ها و حساسیت‌های خاص خود را نسبت به دامنه تأثیر و نوسانات مکانی دارند.

هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی دقیق ساختار مکانی پارامترهای کیفی TDS، سولفات و سدیم در استان مرکزی، تعیین بهترین مدل نیم‌واریوگرام برای هر پارامتر، و تحلیل روندهای زمانی در کیفیت منابع آب زیرزمینی منطقه است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی جهت تدوین راهبردهای مدیریتی، طراحی شبکه‌های پایش و سیاست‌گذاری‌های منابع آب و اقدامات کنترلی در سطح منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعات پیشین متعددی در زمینه کیفیت آب زیرزمینی در ایران و سایر کشورها با استفاده از زمین‌آمار انجام شده‌اند. با این حال بسیاری از این پژوهش‌ها یا فقط یک پارامتر را بررسی کرده‌اند، یا در یک سال خاص محدود شده‌اند، یا رویکرد تحلیل زمانی نداشته‌اند (Talebi, Fatemi, & Wastewater, 2020). نوآوری این تحقیق در تحلیل هم‌زمان سه پارامتر اصلی کیفیت آب، در سه دوره با بازه کلی ۶ ساله (۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲)، با هدف پایش روندهای زمانی و مکانی و مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف کریجینگ، آن را از سایر مطالعات متمایز می‌سازد.

---

[1] Universal Kriging
[2] Drift
[3] Exponential
[4] Gaussian
[5] Spherical

شیری و همکاران مطالعه‌ای برای ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی دشت تبریز انجام داده و تغییرات مکانی پارامترهای TDS، EC، SAR و کلر را با استفاده از روش زمین آمار انجام دادند. برای پیش‌بینی این تغییرات از نمونه-های ۸۶ حلقه چاه که طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ نمونه-برداری شده اند استفاده شده است. مدل‌های استفاده شده در این مطالعه روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و IDW استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که روش کوکریجینگ با واریوگرام گوسین دارای شاخص پراکندگی کمتری است (شیری, کاظمی, & هیدروژئولوژی, ۲۰۲۰).

در پژوهشی دیگر صفوی و همکاران تغییرات مکانی متغیرهای کیفی ۱۰ پارامتر کیفی شامل TH، سدیم، TDS، PH، منیزیم، سولفات، کلراید،SAR، EC و +K مربوط به ۷۰ حلقه چاه آبخوان جنوب دشت قروه و دهگلان در استان کردستان را مورد بررسی قرار دادند. دوره آماری داده‌های مورد استفاده مربوط به سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۱ می باشد. تجزیه و تحلیل این پارامترها در نرم‌افزار +GS و با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و IDW با توان‌های ۱ و ۲ و ۳ انجام شد. نتایج نشان داد که روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده در تخمین اکثر متغیرهای کیفی خطای کمتری داشتند (مریم, البنی, عرفان, مرتضی, & میثم, ۲۰۱۸).

قندالی و همکاران با استفاده از تکنیک‌های زمین آمار و استفاده از شاخص‌های کیفیت آب به پهنه‌بندی کیفیت منابع آب در حوضه آبخیر سمنان پرداختند. آنها از پارامترهای سولفات، کلر، سدیم؛ منیزیم، اسیدیته، هدایت الکتریکی؛ نسبت جذب سدیم و کل جامدات محلول برای ۵۵ منبع آب زیرزمینی استفاده کردند. ارزیابی نتایج درونیابی مکانی برای روش‌های کریجینگ ساده و معمولی و IDW بر اساس معیارهای MAE، RMSE و R2 نشان داد که روش کریجینگ معمولی مناسب‌ترین برآورد را برای منطقه مورد مطالعه دارد (مجتبی, کامران, & محمد, ۲۰۱۹).

در سال ۱۴۰۱ مطالعه ای درباره مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و کریجینگ در پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در دشت دزفول اندیمشک انجام شد. پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق TDS، SAR و EC برای ۶۱ حلقه چاه می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد تلفیق مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم‌های بهینه سازی برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی کاربرد دارد (بهرامی, اگدرنژاد, & محیط, ۲۰۲۳).

در سال ۲۰۲۴ زارع صفت و همکاران جندین روش زمین آمار را بر روی مجموعه داده‌های وسیعی از ۳۰۳۳ رکورد آب زیرزمینی در مناطق ساحلی غرب هلند پرداختند. این روش‌ها شامل درونیابی چندجمله‌ای محلی، کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ جهانی و کریجینگ بیزی تجربی بود. ویژگی منطقه مورد مطالعه از لحاظ محیط هیدروژئولوژیک خاص بوده و طیف وسیعی از آب‌های زیرزمینی شیرین تا شور را نشان می‌دهد. متغیرهای مورد بررسی این تحقیق سولفات، فسفات، کلر، آهن و Nh4 بوده است. نتایج نشان داد روش کریجینگ بیزی تجربی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری داشته و کریجینگ ساده برای تمام پارامترها بجز سولفات بدترین عملکرد را داشته است (Zaresefat, Derakhshani, & Griffioen, 2024).

حسن حیدر و همکاران به انجام پژوهشی در صحرای جنوبی عراق پرداختند. این تحقیق با هدف ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی و توسعه مدل‌های مکانی با استفاده از تکنیک های درونیابی کریجینگ و IDW انجام شد. نمونه-های آب از ۷۵ حلقه چاه در طول فصول خشک و مرطوب برای پارامترهای EC، TDS، pH و کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد غلظت کاتیون‌های اصلی و آنیون‌ها از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی فراتر رفته است (Hassan, Ismaeel, Ethaib, & Al-Zaidi, 2023).

در سال ۲۰۲۳ نیاز و همکاران مطالعه‌ای در پاکستان برای تعیین کیفیت آب انجام دادند. برای این منظور از یک

شاخص کیفیت آب سطحی یکپارچه بر اساس ۱۸ پارامتر هیدروشیمیایی استفاده شد. برای پیش‌بینی این شاخص از کریجینگ معمولی و کریجینگ جهانی استفاده شده و نتایج نشان داد عملکرد کریجینگ جهانی از کریجینگ معمولی بهتر است (Khan et al., 2023).

استان مرکزی یکی از استان‌های مهم کشور ایران است که در قلب فلات مرکزی واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی پل ارتباطی میان مناطق شمالی، غربی و جنوبی کشور به‌شمار می‌رود. این استان با مساحتی حدود ۲۹/۴۰۵ کیلومترمربع، از شمال به استان‌های تهران و قم، از جنوب به لرستان و اصفهان، از شرق به استان اصفهان و از غرب به استان همدان محدود می‌شود. مرکز این استان، شهر اراک است که به‌عنوان یکی از شهرهای صنعتی کشور نیز شناخته می‌شود.

شکل(۱): منطقه مورد مطالعه – استان مرکزی

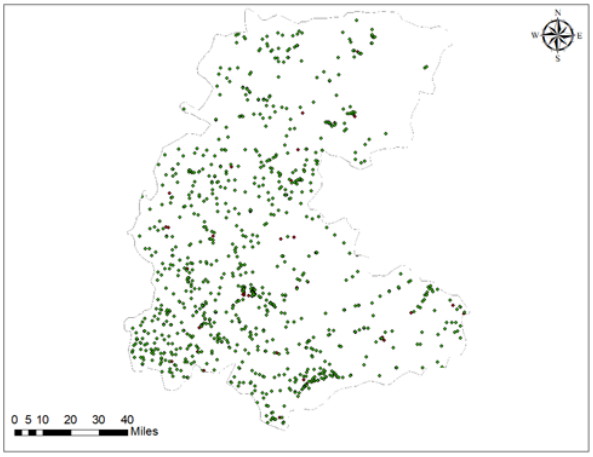
استان مرکزی دارای ۱۲ شهرستان، ۲۶ بخش، ۷۳ دهستان و بیش از ۳۰ شهر است. این استان به‌دلیل تنوع اقلیمی و زمین‌شناسی، از دشت‌های حاصل‌خیز گرفته تا مناطق کوهستانی، شرایط متفاوتی را برای کشاورزی، صنعت و زیست انسانی فراهم آورده است. از دید اقلیمی، این استان دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک تا خشک است. میانگین بارندگی سالانه این منطقه حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است که بیشتر در فصول زمستان و بهار رخ می‌دهد. دمای متوسط سالانه در حدود ۱۴ تا ۱۶ درجه سانتی‌گراد است و در تابستان‌ها گاهی دمای هوا به بیش از ۴۰ درجه نیز می‌رسد. الگوی بارندگی و تبخیر بالا در تابستان‌ها، باعث شده منابع آب سطحی محدود باشند و وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی ایجاد شود. وزش بادهای فصلی، تبخیر بالا و بارندگی نسبتاً کم، موجب شده که وابستگی به منابع آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق استان مرکزی از جمله دشت اراک بسیار بالا باشد. از منظر زمین‌شناسی، استان مرکزی بخشی از زون ساختاری ایران مرکزی محسوب می‌شود و عمدتاً از رسوبات آبرفتی دوران کواترنری تشکیل شده است. این رسوبات عمدتاً شامل شن، ماسه، سیلت و رس هستند که لایه‌های آبدار با ضخامت‌های مختلف را در دشت شکل داده‌اند. به همین دلیل، این دشت دارای سفره‌های آب زیرزمینی نسبتاً غنی است که نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت منطقه دارند.

منابع آب زیرزمینی این منطقه طی سال‌های اخیر تحت فشار زیادی قرار گرفته‌اند. افزایش جمعیت، توسعه صنایع، کشاورزی گسترده و استفاده بی‌رویه از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق باعث افت محسوس سطح ایستابی در بسیاری از نقاط دشت شده است. همچنین شواهد متعددی از افزایش غلظت آلاینده‌هایی نظیر TDS، سدیم و سولفات در آبخوان منطقه گزارش شده است که ضرورت پایش مستمر و مدل‌سازی مکانی کیفیت منابع آب زیرزمینی را دوچندان می‌کند.

از آنجا که این منطقه از جمله مناطق صنعتی کشور نیز محسوب می‌شود (با وجود صنایع بزرگ مانند ماشین‌سازی، آلومینیوم، پالایشگاه و...) احتمال آلودگی منابع آب زیرزمینی توسط فلزات سنگین، پساب‌ها و شورشدگی ناشی از تخلیه نامناسب پساب‌ها نیز در آن وجود دارد. بنابراین این استان به‌عنوان محدوده‌ای حساس از نظر تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت، نیازمند مطالعات علمی و دقیق در زمینه وضعیت کیفی آب زیرزمینی، تحلیل روندهای زمانی و مکانی و برنامه‌ریزی بلندمدت برای مدیریت منابع آبی خود می‌باشد. این پژوهش تلاش دارد با به‌کارگیری روش‌های پیشرفته زمین‌آماری، به شناخت بهتر این وضعیت کمک کند.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، داده‌های کیفی مربوط به سه پارامتر کل جامدات محلول (TDS)، یون سولفات (SO_4^{2-}) و یون سدیم(Na^+) در آب زیرزمینی، طی سه دوره در سال-های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ از چاه‌های مشاهده‌ای در محدوده استان مرکزی استخراج گردید. پراکندگی کلی منابع در شکل ۲ نشان داده شده است. منابع اصلی داده‌ها شامل پایگاه داده شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی، سامانه پایش کیفی آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب و گزارش‌های دوره‌ای این منابع بوده‌اند. بنابر گفته‌های کارشناسان آزمایشگاه این شرکت، نمونه‌برداری از پارامترهای فوق در بازه‌های سه ساله انجام شده و شامل شرایط فصلی نمی‌باشد. به دلیل امکان تفاوت در روش و زمان نمونه گیری از منابع تعداد نمونه ها برای پارامترهای کل جامدات محلول، سدیم و سولفات در سال ۱۳۹۶، ۷۱۹ عددب رای هر سه پارامتر، در سال ۱۳۹۹ به ترتیب ۶۴۰، ۲۳۲ و ۱۵۳ مورد و در سال ۱۴۰۲ به ترتیب ۴۹۸، ۱۱۶ و ۱۲۰ مورد می باشد. این داده ها بر اساس استانداردهای شیمیایی موجود در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی اندازه‌گیری شده و برای کنترل و تضمین کیفیت از پروتکل‌های موجود مانند منحنی کالیبراسیون، کنترل چارت، حدود تشخیص استفاده شده است. با توجه به اینکه این بخش در حیطه تخصص رشته شیمی قرار می‌گیرد و ارتباط مستقیمی با موضوع پژوهش ندارد، از بیان آن صرف‌نر می‌شود. پس از بررسی‌های اولیه از نظر نرمال بودن، داده‌هایی که به علت وجود اختلاف چشم‌گیر مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها با سایر مقادیر موجب ایجاد ناهماهنگی در نتیجه مدل می‌شدند حذف و سایر داده‌ها برای تحلیل زمین‌آماری آماده شدند.



شکل (۲): نحوه پراکندگی منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

در ابتدا، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel و SPSS پالایش شدند. برای اطمینان از دقت تحلیل مکانی، موقعیت جغرافیایی دقیق چاه‌ها (طول و عرض جغرافیایی) نیز مورد بررسی و تصحیح قرار گرفت. داده‌هایی که دارای خطا یا مغایرت شدید با میانگین سری‌های زمانی بودند، با تحلیل‌های آماری و مشورت با کارشناسان فنی حذف شدند و تمامی واحدهای اندازه‌گیری به صورت میلی‌گرم بر لیتر یکسان‌سازی شد. در شکل ۲ نحوه پراکنش منابع آب نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی مکانی پارامترهای کیفی، از روش کریجینگ جهانی استفاده شد. دلیل انتخاب این روش، وجود روند مکانی[1] در پارامترهای بررسی‌شده بود. در روش کریجینگ جهانی، فرض بر آن است که مقدار متغیر Z(x) از دو بخش تشکیل شده است:

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon(x) \quad \text{رابطه ۱)}$$

که در آن M(x) میانگین متغیر که ممکن است در سطح منطقه تغییر کند (روند مکانی) و ε(x) باقیمانده[2] با ساختار تصادفی که با نیم‌واریوگرام مدل‌سازی می‌شود.

[1] spatial trend
[2] residual

کریجینگ جهانی نسبت به کریجینگ معمولی، در شرایطی که میانگین پارامترها در سطح منطقه ثابت نیست (مثل دشت‌هایی با شیب هیدروشیمیایی یا منابع آلاینده متغیر) دقت بالاتری دارد.

برای تحلیل ساختار مکانی داده‌ها، نیم‌واریوگرام تجربی برای هر پارامتر و سال محاسبه شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار تخصصی ArcGIS، سه مدل نمایی ، گوسی و کروی بر آن‌ها برازش یافت. نیم‌واریوگرام، تابعی است که میزان تشابه یا اختلاف بین داده‌ها را برحسب فاصله مکانی بیان می‌کند. شکل کلی نیم‌واریوگرام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}\,\mathrm{E}\left[(Z_{(x)} - Z_{(x+h)})^2\right] \quad \text{رابطه ۲)}$$

که در آن γ (h) مقدار نیم‌واریوگرام برای فاصله h، Z(x) مقدار متغیر در موقعیت x، E امید ریاضی و h بردار فاصله بین دو نقطه است.

در این پژوهش سه مدل نیم‌وایروگرام مختلف برای مدل‌سازی ساختار مکانی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته شده است:

۱. مدل نمایی: مناسب برای داده‌هایی با تغییرات ناگهانی در فاصله‌های کوتاه، دارای دامنه تأثیر نامحدود (به‌طور تقریبی)

$$\gamma(h) = C_0 + C\left[1 - exp\left(-\frac{h}{a}\right)\right] \quad \text{رابطه ۳)}$$

۲. مدل گوسی: مناسب برای مدل‌سازی داده‌های دارای همبستگی قوی در فاصله‌های نزدیک، برای داده‌هایی با تغییرات نرم و پیوسته

$$\gamma(h) = C_0 + C\left[1 - exp\left(-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)\right)\right] \quad \text{رابطه ۴)}$$

۳. مدل کروی: مدل پرکاربرد و رایج در زمین‌آمار، دارای دامنه تأثیر مشخص (a) و مقادیر γ ثابت پس از آن

$$\gamma(h) = C_0 + C\left[\left(\frac{3h}{2a}\right) - \left(\frac{h^3}{2a^2}\right)\right] \quad \text{برای } h \le a \quad \text{رابطه ۵)}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad \text{برای } h > a$$

پارامترهای اصلی نیم‌واریوگرام شامل واریانس خطای اندازه‌گیری یا نوسانات کوچک مقیاس[1] (C_0)، آستانه واریانس کل[2] ($C + C_0$)، دامنه تأثیر[3]؛ فاصله‌ای که بعد از آن دیگر همبستگی مکانی وجود ندارد (a) می باشد. برازش مدل‌ها با روش حداقل مربعات و ارزیابی چشمی و آماری انجام شد (جهانگرد, ۱۳۸۵).

برای تعیین دقت هر مدل کریجینگ، از روش اعتبارسنجی متقابل[4] استفاده گردید. در این روش هر داده یک بار حذف و مقدار آن با استفاده از بقیه داده‌ها پیش‌بینی می‌شود. شاخص‌های آماری مورد استفاده عبارت بودند از:

ریشه میانگین مربعات خطا[5]: حساس به خطاهای بزرگ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(y_{observed} - y_{predicted})^2} \quad \text{رابطه ۶)}$$

میانگین قدر مطلق خطا[6]: شاخص ساده و قابل فهم

$$MAE = 100 * \frac{1}{n}\sum\left|y_{observed} - y_{predicted}\right| \quad \text{رابطه ۷)}$$

ضریب تعیین[7]: برای سنجش تطابق مدل با داده واقعی

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_{predicted} - y_{observed})}{\sum {y_{predicted}}^2 - \frac{y_{observed}}{n}} \quad \text{رابطه ۸)}$$

مدلی که دارای کمترین RMSE و MAE و بیشترین R^2 بود، به عنوان مدل برتر انتخاب و نقشه نهایی بر اساس آن ترسیم شد.

[1] Nugget
[2] Sill
[3] Range
[4] Cross-validation
[5] Root Mean Square Error (RMSE)
[6] Mean Absolute Error (MAE)
[7] R Squared (R^2)

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج مدل‌سازی مکانی سه پارامتر کلیدی کیفیت آب زیرزمینی شامل TDS، سولفات و سدیم در استان مرکزی طی سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ ارائه می‌شود. برای درک بهتر ویژگی‌های آماری پارامترهای کیفی مورد بررسی، آمار توصیفی شامل کمینه[1] ، بیشینه[2] ، میانگین[3] ، انحراف معیار[4] و ضریب تغییرات برای هر یک از سه پارامتر در سه سال مطالعه شده در جدول ۱ ارائه شده است. این اطلاعات کمک می‌کند تا دامنه تغییرات، توزیع داده‌ها و پراکندگی آنها بهتر تحلیل شود.

جدول (۱): مشخصات آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در استان مرکزی

پارامتر	سال	تعداد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
TDS	۱۳۹۶	۷۱۹	۱۱۰	۳۴۳۷	۶۰۳.۵۹	۴۸۵.۷۳	۰.۸۰
TDS	۱۳۹۹	۶۴۰	۹۹	۴۵۰۱	۶۳۶.۶۲	۵۳۳.۳۶	۰.۸۴
TDS	۱۴۰۲	۴۹۸	۶۶	۹۹۰	۶۱۵.۹۲	۵۴۹.۱۵	۰.۸۹
سولفات	۱۳۹۶	۷۱۹	۱	۱۷۰۰	۱۳۵.۳۵	۱۷۹.۳۸	۱.۳۳
سولفات	۱۳۹۹	۱۵۳	۶	۱۳۰۸	۱۷۵.۶۳	۱۱۹.۰۴	۱.۱۳
سولفات	۱۴۰۲	۱۲۰	۰	۱۳۳۷.۵	۱۳۵.۰۴	۲۱۸.۴۹	۱.۶۲
سدیم	۱۳۹۶	۷۱۹	۲	۸۰۰	۸۶.۶۳	۱۱۸.۷۶	۱.۳۷
سدیم	۱۳۹۹	۲۳۲	۱.۰۷	۱۰۹۰	۱۳۱.۸۶	۱۷۴.۸۲	۱.۳۳
سدیم	۱۴۰۲	۱۱۶	۱	۱۱۰۱	۷۹.۰۹	۱۴۸.۰۳	۱.۸۷

بررسی میانگین‌ها در این جدول نشان می‌دهد که غلظت پارامتر TDS در سال ۱۳۹۹ نسبت به دو سال دیگر افزایش یافته است. پارامتر سولفات نیز مانند پارامتر TDS در سال ۱۳۹۹ دارای غلظت بشتری نسبت به دو سال دیگر می‌باشد. مقدار میانگین پارامتر سدیم نیز نشان‌دهنده آن است که مقدار غلظت این پارامتر نیز مانند دو پارامتر TDS و سدیم در سال ۱۳۹۹ نسبت به دو سال دیگر افزایش داشته است.

[1] Minimum
[2] Max
[3] Mean
[4] Standard Deviation (Std. Dev)

این افزایش غلظت برای هر سه پارامتر در یک سال ممکن است ناشی از افزایش فعالیت‌های صنعتی منطقه و یا تغییرات جوی باشد که برای اطمینان از آن باید مورد بررسی مدیران تصمیم‌گیر قرار گیرد.

به‌منظور بررسی رابطه آماری بین پارامترهای مورد مطالعه، ضریب همبستگی پیرسون (r) بین آن‌ها محاسبه شد که در جدول ۲ نمایش داده شده است. این تحلیل می‌تواند نشان دهد که آیا بین افزایش یک پارامتر با پارامتر دیگر رابطه‌ای وجود دارد یا خیر.

جدول (۲): میزان همبستگی بین پارامترهای TDS، سولفات و سدیم در سال ۱۳۹۶

۱۳۹٦	سدیم	سولفات	TDS
TDS	۰.۹۳۸	۰.۸۹۵	۱
سولفات	۰.۸۸۸	۱	
سدیم	۱		

جدول (۳): میزان همبستگی بین پارامترهای TDS، سولفات و سدیم در سال ۱۳۹۹

۱۳۹۹	سدیم	سولفات	TDS
TDS	−۰.۰۴۸	−۰.۰۲۵	۱
سولفات	۰.۸۱۳	۱	
سدیم	۱		

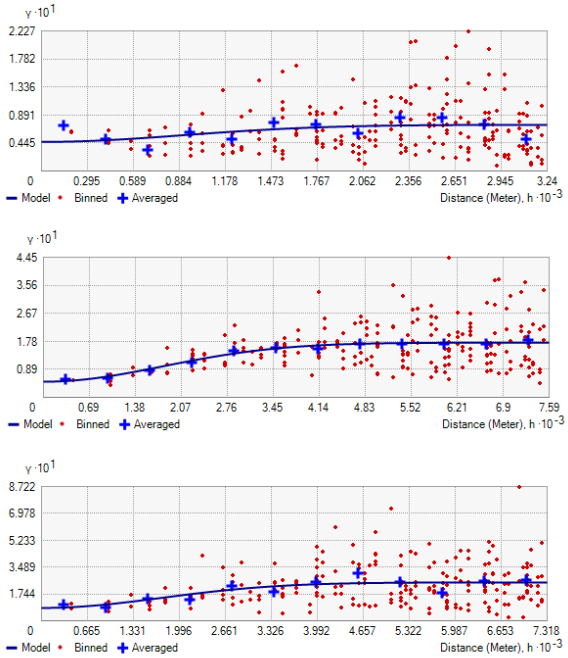
جدول (۴):. میزان همبستگی بین پارامترهای TDS، سولفات و سدیم در سال ۱۴۰۲

۱٤۰۲	سدیم	سولفات	TDS
TDS	−۰.۲۰۸	−۰.۱۸۹	۱
سولفات	−۰.۱۲۶	۱	
سدیم	۱		

مقدار همبستگی بالا (بیش از۰.۷) بین TDS و سدیم معمولاً به دلیل تأثیر بالای سدیم در شوری آب است. همچنین، همبستگی قابل توجه بین سولفات و TDS نیز ممکن است نشان‌دهنده وجود منشأ تبخیری یا تأثیر فعالیت‌های انسانی باشد.

در این پژوهش مدل‌سازی با استفاده از روش کریجینگ جهانی و سه نوع مدل نیم‌واریوگرام (نمایی، گوسی و کروی) انجام شد و دقت مدل‌ها بر اساس شاخص‌های RMSE، MAE و R^2 مقایسه گردید. جزییات مربوط به مدل‌های اجرا شده در جدول ۵ نشان داده شده است. تمامی مدل ها بصورت جهت‌دار با نوع همسایگی دایره ای با حداقل ۵ نقطه همسایگی در نظر گرفته شده است.

با وجود اینکه مقدار ضریب تعیین برای هر سه مدل در سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ برای پارامتر TDS برابر ۰.۸۹ می باشد اما با توجه به اینکه مقدار RMSE و MAE مدل گوسی نسبت به سایر مدل‌ها (نمایی و کروی) کمتر است مدل گوسی بهترین عملکرد را برای پارامتر TDS نشان می‌دهد شکل ۳ نمودار تغییر نمای کلی را برای پارامتر TDS نشان می‌دهد.

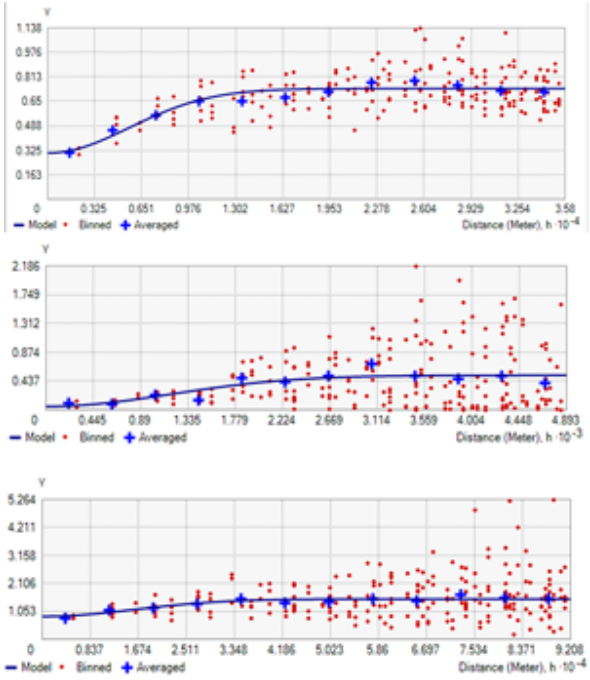


شکل (۳):. نمودار تغییر نمای کلی پارامتر TDS با استفاده از مدل کریجینگ (گوسی) – (a) ۱۳۹۶ – (b) ۱۳۹۹ – (c) ۱۴۰۲

برای پارامتر سولفات، مدل گوسی در هر سه سال عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر ارائه داد. مقدار ضریب تعیین برای این مدل‌ها در سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۰.۸۷، ۰.۵۹ و ۰.۴۸ می‌باشد که نشان-دهنده دقت بالای مدل گوسی نسبت به سایر مدل‌ها می باشد. شکل ۴ نمودار تغییر نمای کلی پارامتر سولفات را برای سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.

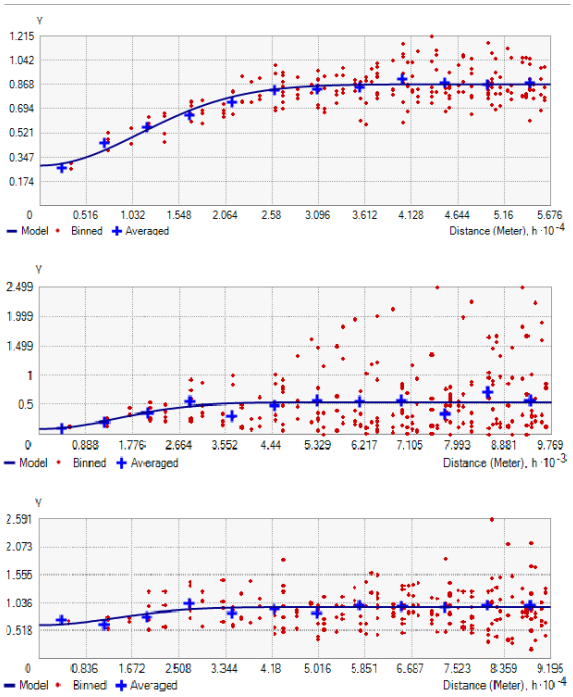
جدول (۵): نتایج حاصل از مدل کریجینگ در شبیه سازی

پارامتر	سال	مدل	Nugget	Sill	RMSE	MAE	R2	مدل بهینه
TDS	۱۳۹۶	نمایی	۰.۰۵	۰.۰۲	۲۸۴.۵۰	۱۷۳.۶۵	۰.۸۹	
		گوسی	۰.۰۵	۰.۰۳	۲۸۲.۸۵	۱۶۹.۰۵	۰.۸۹	✓
		کروی	۰.۰۵	۰.۰۳	۲۸۳.۰۵	۱۷۰.۷۴	۰.۸۹	
	۱۳۹۹	نمایی	۰.۰۵	۰.۱۳	۱۵۹.۴۱	۱۱۸.۳۲	۰.۹۳	
		گوسی	۰.۰۵	۰.۱۲	۱۶۷.۵۴	۱۲۳.۲۲	۰.۹۲	✓
		کروی	۰.۰۵	۰.۱۳	۱۶۰.۱۷	۱۱۶.۸۰	۰.۹۳	
	۱۴۰۲	نمایی	۰.۰۸	۰.۱۷	۳۴۹.۰۲	۲۱۱.۱۳	۰.۷۹	
		گوسی	۰.۰۸	۰.۱۷	۳۴۷.۹۶	۲۱۰.۹۲	۰.۷۹	✓
		کروی	۰.۰۸	۰.۱۷	۳۴۹.۷۸	۲۱۳.۱۰	۰.۷۹	
سولفات	۱۳۹۶	نمایی	۰.۲۵	۰.۵۱	۵۷.۶۸	۳۹.۲۰	۰.۸۹	
		گوسی	۰.۲۵	۰.۴۸	۶۵.۲۲	۴۷.۴۳	۰.۸۷	✓
		کروی	۰.۲۵	۰.۴۹	۶۲.۰۴	۴۴.۴۹	۰.۸۸	
	۱۳۹۹	نمایی	۰.۰۳	۰.۵۲	۱۲۷.۹۵	۵۵.۹۸	۰.۶۴	
		گوسی	۰.۰۳	۰.۲۵	۱۳۵.۰۷	۵۸.۷۳	۰.۵۹	✓
		کروی	۰.۰۳	۰.۵۲	۱۳۱.۶۵	۵۷.۶۲	۰.۶۱	
	۱۴۰۲	نمایی	۰.۸۶	۰.۶۹	۱۷۲.۱۷	۹۳.۴۹	۰.۵۰	
		گوسی	۰.۸۶	۰.۶۵	۱۷۵.۲۳	۹۶.۶۲	۰.۴۸	✓
		کروی	۰.۸۶	۰.۷۲	۱۷۳.۳۲	۹۴.۴۳	۰.۴۹	
سدیم	۱۳۹۶	نمایی	۰.۱۹	۰.۷۲	۵۴.۵۱	۳۳.۰۸	۰.۸۳	
		گوسی	۰.۱۹	۰.۶۶	۶۱.۴۴	۳۸.۷۳	۰.۷۹	✓
		کروی	۰.۱۹	۰.۶۸	۵۶.۹۹	۳۵.۵۰	۰.۸۲	
	۱۳۹۹	نمایی	۰.۰۳	۰.۵۸	۱۲۶.۸۱	۴۹.۲۰	۰۴۶	
		گوسی	۰.۰۳	۰.۴۳	۱۲۷.۹۹	۴۹.۹۰	۰.۴۵	✓
		کروی	۰.۰۳	۰.۵۱	۱۲۷.۲۲	۴۹.۱۱	۰.۵۰	
	۱۴۰۲	نمایی	۰.۶۲	۰.۳۶	۱۴۲.۷۲	۶۰.۴۴	۰.۲۹	
		گوسی	۰.۶۲	۰.۳۹	۱۴۱.۱۷	۵۹.۴۷	۰.۲۹	✓
		کروی	۰.۶۲	۰.۳۵	۱۴۱.۰۸	۵۹.۱۰	۰.۲۹	



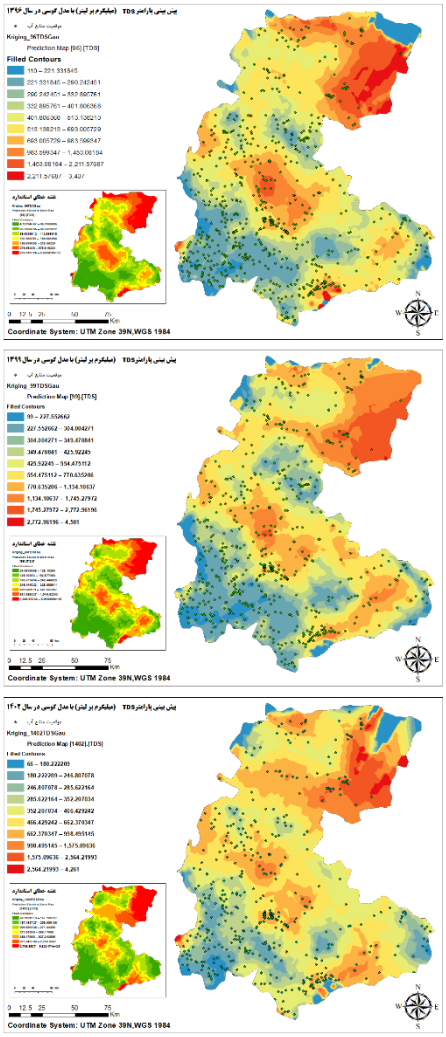
شکل (۴): نمودار تغییر نمای کلی پارامتر سولفات با استفاده از مدل کریجینگ (گوسی) – (a) ۱۳۹۶ – (b) ۱۳۹۹ – (c) ۱۴۰۲

پارامتر سدیم نیز مشابه پارامترهای سدیم و TDS، در تمامی سال‌ها با مدل گوسی بهترین برازش را داشت. مقدار ضریب تعیین برای این مدل‌ها در سال‌های ۱۳۹۶،۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۰.۷۹، ۰.۴۵ و ۰.۲۹ می‌باشد. همچنین مقدار RMSE پارامتر سدیم در سال ۱۴۰۲ نسبت به دو سال دیگر افزایش داشته است. شکل ۵ نمودار تغییر نمای کلی را برای پارامتر سدیم برای سال‌های ۱۳۹۶،۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.



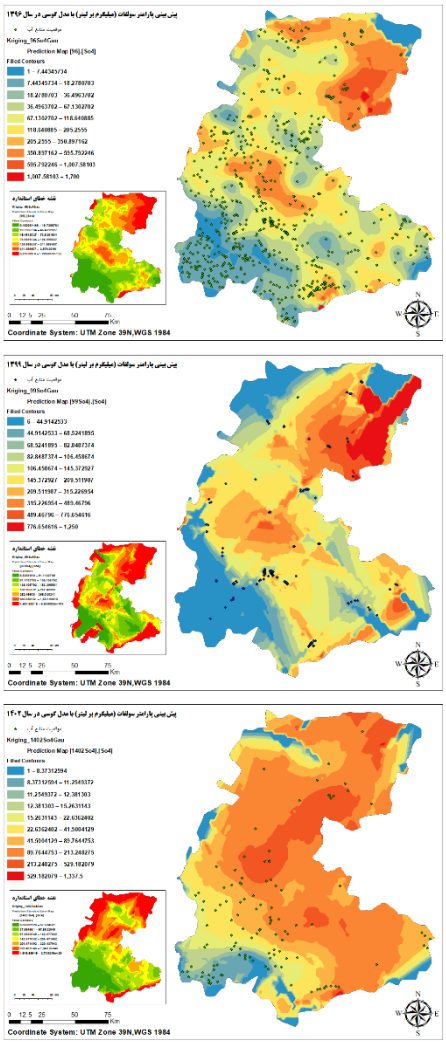
شکل (۵): نمودار تغییر نمای کلی پارامتر سدیم با استفاده از مدل کریجینگ (گوسی) – (a) ۱۳۹۶ – (b) ۱۳۹۹ – (c) ۱۴۰۲

نقشه‌های پیش‌بینی مکانی که از طریق روش کریجینگ جهانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تولید شده‌اند، نمایانگر توزیع فضایی غلظت پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در این محدوده می‌باشند. شکل‌های ۶ تا ۸ به ترتیب نقشه‌های پیش‌بینی پارامترهای کیفی TDS، سولفات و سدیم را در سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ نمایش می‌دهد. نقشه‌های خطای استاندارد هریک از پیش‌بینی‌ها نیز در تصاویر قابل مشاهده است.



شکل (۶): نقشه پیش بینی پارامتر کیفی TDS یا استفاده از مدل کریجینگ (گوسی) در سال های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲

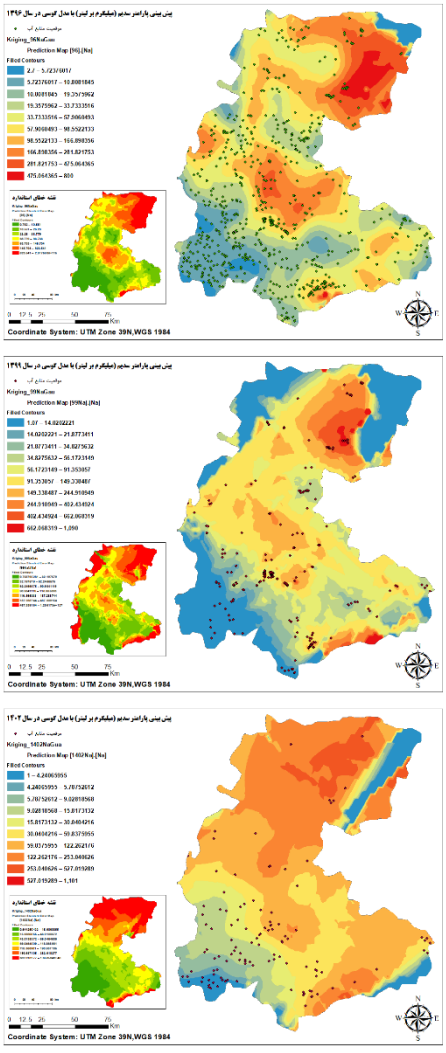
همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، غلظت پارامتر TDS در سال ۱۳۹۶در بیشتر نواحی شمال غربی، غربی و جنوبی منطقه در محدوده قابل قبول قرار دارد، اما مناطق مرکزی و شمال شرقی مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند. در سال ۱۳۹۹، با گسترش مناطق دارای غلظت بالا به سمت نواحی شمال شرقی، یک الگوی افزایش شوری دیده می‌شود. در سال ۱۴۰۲، غلظت TDS اگرچه از لحاظ مقدار در برخی منابع کاهش یافته و موجب پایین آمدن میانگین غلظت شده است، اما پراکندگی این پارامتر در شکل ۶ نشان می‌دهد که الگوی شوری در مناطق مرکزی و جنوبی نسبت به سال‌های قبل گسترده شده است.



شکل (۷): نقشه پیش بینی پارامتر کیفی سولفات یا استفاده از مدل کریجینگ (گوسی) در سال های ۱۳۹۹،۱۳۹۶ و ۱۴۰۲

با توجه به شکل ۷ پارامتر سولفات در سال ۱۳۹۶، در بیشتر مناطق در سطوح نسبتاً پایینی قرار دارد، اما نقاطی در غرب، بخش مرکزی و قسمت‌هایی از شمال شرقی منطقه دارای غلظت بالا هستند. در سال ۱۳۹۹، این تمرکز به نواحی شمال شرقی گسترش می‌یابد. با توجه به محدودیت تعداد نمونه‌های سولفات در سال ۱۳۹۹ و پراکنده نبودن

نقاط دارای نمونه، نقشه خطای استاندارد این بخش دارای خطایی بیشتر در مناطق خالی از نقاط نمونه برداری می-باشد. در سال ۱۴۰۲با وجود کاهش غلظت سولفات در نمونه‌ها، پراکندگی منابع دارای غلظت های بالاتر بطور گسترده‌تر در منطقه مشاهده می‌شود.



شکل (۸): نقشه پیش بینی پارامتر کیفی سدیم با استفاده از مدل کریجینگ (گوسی) در سال های ۱۳۹۹،۱۳۹۶ و ۱۴۰۲

همانطور که در شکل ۸ نمایش داده شده است، پارامتر سدیم در نقشه‌های سال ۱۳۹۶ تمرکز نسبی در مناطق مرکزی و شمالی منطقه است. در سال ۱۳۹۹، پراکندگی سدیم به سمت نواحی جنوب شرقی گسترش می‌یابد، اما با توجه به کاهش تعداد نمونه‌ها نسبت به سال ۱۳۹۹ پیوستگی توزیع غلظت سدیم در مناطق غربی کاسته شده است. در سال ۱۴۰۲، با وجود کاهش میانگین غلظت سدیم نسبت به سال‌های قبل، پراکندگی سدیم با غلظت بالا در منطقه بیشتر شده و بخش های بیشتری از منطقه را شامل گردیده است.

نتیجه‌گیری این بخش نشان می‌دهد که مدل گوسی برای تمامی پارامترها در تمام سال‌ها بهتر عمل کرده است. دقت پیش‌بینی برای پارامتر TDS در سال ۱۳۹۹ نسبت به دو سال دیگر بالاتر بوده، و خطاها در سال ۱۴۰۲ افزایش یافته‌اند. در مورد پارامتر سولفات دقت پیش‌بینی در سال ۱۳۹۶ نسبت به دو سال دیگر بالاتر بوده و خطای مدل در سال ۱۴۰۲ بیشتر از سال‌های دیگر می‌باشد. برای پارامتر سدیم نیز مانند سولفات دقت مدل در سال ۱۳۹۶ نسبت به سال‌های دیگر بالاتر بوده و خطای مدل نیز مانند دو پارامتر دیگر در سال ۱۴۰۲ بالاتر می باشد. با وجود کاهش مقادیر میانگین غلظت هر سه پارامتر در سال ۱۴۰۲، بطور کلی روند کیفی منابع آب زیرزمینی این منطقه بر اساس نقشه-های پیش‌بینی شده نشان‌دهنده افت نسبی کیفیت در سال ۱۴۰۲ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش‌های زمین‌آماری به‌ویژه کریجینگ جهانی روشی مؤثر برای مدل‌سازی مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در استان مرکزی می‌باشد و می تواند درک بهتری از پراکنش مکانی و روندهای زمانی تغییرات کیفیت آب فراهم آورد. این پژوهش نشان داد که روش‌های زمین‌آماری نه‌تنها ابزاری علمی برای درک بهتر وضعیت کیفیت آب زیرزمینی هستند، بلکه می‌توانند به‌عنوان ابزار تصمیم‌سازی مؤثر برای مدیران منابع

آب در برنامه‌ریزی، پایش و کنترل آلودگی‌های آبی استفاده شوند.

بررسی سه پارامتر کلیدی TDS، سولفات و سدیم طی سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۲ نشان داد که:

مدل گوسی برای پیش‌بینی مقادیر هر سه پارامتر در تمامی سال‌ها عملکرد دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و دارای کمترین مقدار RMSE و بیشترین R^2 بوده است. این مدل ساختار نرم و پیوسته مکانی را برای پارامترهای مورد مطالعه بهتر بازنمایی کرد.

بررسی آماری نشان داد که مقادیر میانگین TDS، سولفات و سدیم در سال ۱۳۹۹ نسبت به سال‌های قبل افزایش یافته که برای دانستن علت آن می‌توان به بررسی نقشه‌های بارش، سطح آب‌های زیرزمینی به منظور تشخیص میزان برداشت و بررسی تغییرات زمین شناسی منطقه پرداخت.

از سوی دیگر، بررسی مدل‌های مکانی نشان داد که دقت مدل‌های اجرا شده برای پارامتر TDS در سال ۱۳۹۹ و برای پارامترهای سولفات و سدیم در سال ۱۳۹۶ از دو سال دیگر بالاتر بوده است. علت این امر را می‌توان با توجه به نقشه‌های تولید شده در تعداد نمونه‌برداری مناسب‌تر و پراکندگی بهتر نقاط نمونه‌برداری شده در منطقه دانست.

تحلیل همبستگی نشان‌دهنده‌ی رابطه قوی بین TDS با سدیم و سولفات بود که بیانگر منشأ مشترک یا تأثیر ترکیبی آن‌ها بر شوری و کیفیت آب است.

مقایسه پژوهش انجام شده با پژوهش‌های قبلی نتایج مشابهی را در زمینه روش‌های استفاده شده نشان می‌دهد. از جمله اینکه مدل گوسی در روش کریجینگ دقت بالاتری بر پارامترهای مورد استفاده در مطالعات قبلی داشته است.

با توجه به یافته‌های این مطالعه، پیشنهاد می‌شود کیفیت آب زیرزمینی با تمرکز بر پارامترهای شوری، به‌ویژه در مناطق دارای روند افزایشی TDS بطور مداوم پایش شود. همچنین برای جلوگیری از گسترش آلودگی از GIS و زمین‌آمار در پایش مناطق حساس به افت کیفیت استفاده شود. تکرار مطالعه در بازه‌های زمانی آینده جهت تحلیل روندهای بلندمدت تغییرات کیفی می تواند به شناخت بهتر از منطقه و ارائه راهکارهای مدیریتی کمک کند. علاوه بر آن به‌روزرسانی مستمر پایگاه‌های داده کیفی منابع آب و انجام مطالعات تکمیلی با افزودن پارامترهای دیگر مانند نیترات، کلراید یا فلزات سنگین می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به کیفیت آب زیرزمینی به مدیران تصمیم‌گیر دهد.

منابع

بهرامی, اگدرنژاد, & محیط, ا. J. م. پ. د. ب. (۲۰۲۳). مقایسه مدل های شبکه عصبی مصنوعی و کریجینگ در پیش بینی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی (SAR، TDS و EC) دشت دزفول اندیمشک. ۸(۴), ۳۶۵-۳۷۷.

جهانگرد, م. (۱۳۸۵). پدومتری: آمار مکانی (جلد۲): پلک.

شیری, کاظمی, & هیدروژئولوژی, ش. 2020) .J). بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و IDW.

مجتبی, ق., کامران, ش., & محمد, س. م. (۲۰۱۹). پهنه بندی کیفیت منابع آب برای کاربری کشاورزی و شرب با استفاده از شاخص کیفیت آب و تکنیک های زمین آمار در حوضه آبخیز سمنان.

مریم, ص. گ., البنی, م. ا., عرفان, ب., مرتضی, م. ص., & میثم, س. ج. (۲۰۱۸). بررسی و ارزیابی تغییرات مکانی متغیر های کیفی آب زیرزمینی جنوب دشت قروه و دهگلان با استفاده از روش های زمین آمار.

Ahmadi, S. H., Sedghamiz, A. J. E. m., & assessment. (2007). Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *129*, 277-294 .

Bourotte, C., Bertolo, R., Almodovar, M., & Hirata, R. J. A. d. A. B. d. C. (2009). Natural occurrence of hexavalent chromium in a sedimentary aquifer in Urânia, State of São Paulo, Brazil. *81*, 227-242 .

Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*: Oxford university press.

Hassan, H. M., Ismaeel, A. J., Ethaib, S., & Al-Zaidi ,B. M. J. M. M. o. E. P. (2023). Developing Spatial Models of Groundwater Quality in the Southwestern Desert of Iraq Using GIS, Inverse Distance Weighting, and Kriging Interpolation Techniques. *10*(4 .(

Khan, M., Almazah, M. M., EIlahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A., Zaman, B. J. G., Natural Hazards, & Risk. (2023). Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary kriging and Universal kriging. *14*(1), 2190853 .

Talebi, M. S., Fatemi, M. J. J. o. A. R. i. W., & Wastewater. (2020). Assessment of the quality and quantity of groundwater in Bahadoran plain using neural network methods, geostatistical and multivariate statistical analysis. *7*(2), 144-151 .

Tarkian Ivaragi, H., NAZARI, N., Faramarzi, A., Khani, A. J. I. J. o. I., & Drainage. (2022). Evaluation of mapping methods in spatial distribution of groundwater quality indicators (Case study: Turkmenchay region). *16*(1), 83-94 .

Zaresefat, M., Derakhshani, R., & Griffioen, J. J. W. (2024). Empirical Bayesian Kriging, a robust method for spatial data interpolation of a large groundwater quality dataset from the Western Netherlands. *16*(18), 2581 .