

Assessment of Geostatistical Methods in Groundwater Quality Evaluation of Mashginshahr Plain Using WQI Index

Yaser Hoseini * 

Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

ABSTRACT: In this study, the groundwater quality of the Meshgin Plain was investigated based on the WQI index and using geostatistical methods. As the results and evaluation statistics of the cokriging method showed, the variogram of the random variable WQI index from the exponential model had a nugget effect (0.02) for the WQI index and (0.05) for the auxiliary variable electrical conductivity. the sill of the variogram for the WQI variable was (0.7) and for the auxiliary variable electrical conductivity was (0.77), which indicates that the role of the structured component of the variogram is greater than the role of its unstructured component, and this indicates the strength of the spatial structure of the region for both the random variables WQI index and electrical conductivity at the regional level. The results showed that geostatistical methods and simple cokriging model, with a coefficient of determination of 0.85 and a root mean square error of 3.27, has an accurate estimate of the WQI random variable. In general, it can be said that the evaluation using the kriging method shows that the WQI index at the regional level is generally at the level of 0-100 and is in the “Excelent” and “Good” quality range, and more than 96 percent of the studied area has good quality for drinking purposes. The results of this study showed that geostatistical estimates are of great importance in determining the WQI index at the regional level, especially in areas where water is withdrawn for drinking purposes, due to the high accuracy of this method.

Review History:

Received: Feb. 01, 2026

Revised: Jul. 02, 2026

Accepted: Jul. 09, 2026

Available Online: Jul. 17, 2026

Keywords:

Groundwater Quality

Geostatistics

WQI Index

GIS

Plain

1- Introduction

Groundwater is a critical water source in arid and semi-arid regions, particularly in northwestern Iran, where precipitation is limited and surface water resources are scarce. Mashgin Plain, covering 1705 km², exhibits elevations from 357 to 2541 m above sea level and experiences a semi-humid temperate climate according to Ambriz classification and semi-arid conditions according to De Martonne. Monitoring groundwater quality is essential to ensure safe drinking water and sustainable agricultural practices.

The Water Quality Index (WQI) provides a quantitative measure for overall water quality by integrating multiple physico-chemical parameters into a single value. It simplifies complex datasets, allowing for spatial and temporal comparisons, and has been widely applied in groundwater studies globally. Obeidavi and Houshmand (2021) investigated the spatial distribution of the water quality index based on World Health Organization (WHO) standards using Geographic Information System (GIS) in the Firoozabad region of Khuzestan Province. The results showed that in certain parts of the region, the concentrations of four parameters, calcium, chloride, turbidity, and total

hardness, exceeded permissible limits, while the values of other parameters complied with WHO standards.

Heshmati and Beigi Harchgani (2012) assessed groundwater quality in Shahrekord for agricultural use using geostatistical methods and applied Ordinary Kriging for spatial interpolation of variables. The results indicated consistency and correlation among the observations, suggesting the high accuracy of semivariogram models and the Ordinary Kriging estimator in estimating groundwater quality indices in Shahrekord. In another study, Nakhai and Vediati (2013) evaluated the water quality of 23 qanats in Tehran Province for various drinking and agricultural uses using fuzzy logic. The results demonstrated that the fuzzy inference model is an appropriate tool for assessing qanat water quality. Hassanali pour et al. (2022) assessed the effects of urban development in Ardabil city on surface and groundwater quality in the Ardabil Plain. They reported that in the northern, northeastern, and eastern sections toward the central, southern, and southeastern areas, the concentrations of water quality parameters increased, attributing this to the deterioration of water quality resulting from urban development

*Corresponding author's email: y_hoseini@uma.ac.ir

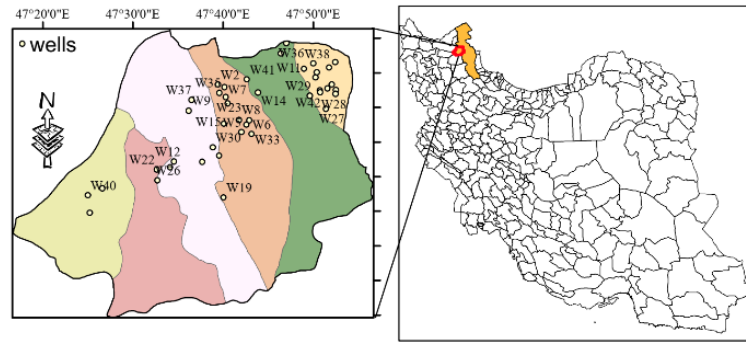


Fig. 1. Illustrates the Mashgin Plain study area and well locations.

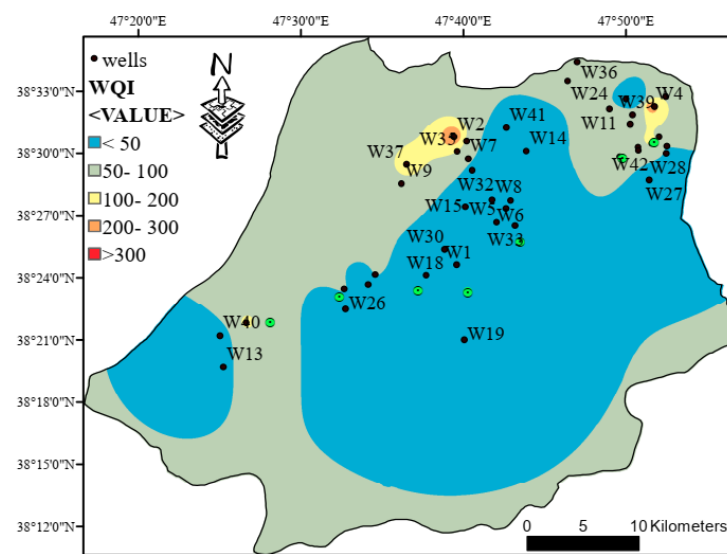


Fig. 2. Shows the spatial distribution of WQI values across the plain.

Coupling WQI with geostatistical techniques such as co-kriging enhances spatial predictions by accounting for the correlation between water quality parameters and auxiliary variables.

2- Methodology

Groundwater samples were collected from 42 wells distributed across Mashgin Plain. In situ measurements included pH, temperature, and EC, while laboratory analyses determined TDS, major cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}), and major anions (HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , Cl^{-} , SO_4^{2-}) using standard methods. Data normalization and trend analysis were performed before geostatistical modeling to minimize spatial bias.

The WQI was calculated using the weighted sum method, assigning higher weights to parameters with greater health impacts, such as nitrate and EC. Each parameter was normalized against its standard drinking water guideline value. The WQI values were then classified into five

categories: Excellent (<50), Good (50–100), Poor (100–200), Very Poor (200–300), and Unsuitable (>300).

Geostatistical analysis involved ordinary kriging and simple co-kriging, using EC as an auxiliary variable due to its strong correlation with other ions. Model validation was performed using cross-validation metrics including R^2 , RMSE, MAE, EF, and relative error percentage (ϵ). Figure 1 illustrates the Mashgin Plain study area and well locations the basic elements of the extended abstract are listed below in the order in which they should appear:

3- Results and Discussion

The co-kriging approach using EC as an auxiliary variable provided the highest prediction accuracy, outperforming ordinary kriging and other univariate methods. Cross-validation yielded $R^2 = 0.85$ and RMSE = 3.27, indicating a strong agreement between observed and predicted WQI values.

Spatial mapping revealed that most of Mashgin Plain

exhibits high groundwater quality. Table 1 summarizes the WQI classification and the area coverage of each class. Over 44% of the plain falls into the “excellent” category, and an additional 52% into the “good” category, totaling more than 96% suitable for drinking purposes. Only a small fraction (4%) falls into the “poor” or “very poor” categories.

The map highlights areas of relatively higher EC and TDS, corresponding to zones with lower water quality. These results suggest that groundwater in Mashgin Plain is largely suitable for consumption but requires regular monitoring in localized areas where salinity may increase due to agricultural or natural factors.

4- Conclusions

This study demonstrates the effectiveness of combining WQI and geostatistical methods for groundwater quality assessment. Simple co-kriging with EC as an auxiliary variable provides high-resolution predictions of water quality, outperforming univariate methods. More than 96% of Mashgin Plain is classified as having “excellent” or “good” water quality, confirming the suitability of its groundwater for drinking purposes. These findings provide a reliable

framework for future groundwater monitoring and sustainable resource management in semi-arid regions

References

- [1] M. Hassanaliipour, A. Esmailiouri, E. Ahmadi, Y. Imani, M. Raeuf, M.R. Abazar, Assessment of urban development impacts on quantity and quality of surface and groundwater in Ardabil plain, *Environmental Science Studies*, 7(3) (2022) 5374–5385 (in Persian).
- [2] S. Hashmati, H. Beigi Harchgani, Spatial patterns and zoning of groundwater quality indices of Shahr-e-Kord for designing drip irrigation systems, *Proceedings of the 5th Environmental Engineering Conference*, Tehran, Iran (2012) (in Persian).
- [3] M. Nakhaei, M. Vadiati, Application of fuzzy inference model for assessing qanat water quality for drinking and agricultural uses (Tehran province), *Journal of Advanced Applied Geology*, 6 (2013) (in Persian).
- [4] H.F. Obidavi, Z. Fatemeh, Spatial distribution of water quality index based on WHO standards using GIS: Case study of Firoozabad groundwater, *Human and Environment Journal* (2021) (in Persian).



ارزیابی روش‌های زمین‌آماري در بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت مشگین شهر با استفاده از شاخص WQI

یاسر حسینی^{*id}

گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶

کلمات کلیدی:

کیفیت آب زیرزمینی

زمین آمار

شاخص WQI

GIS

دشت

خلاصه: در این تحقیق کیفیت آب زیرزمینی دشت مشگین بر اساس شاخص WQI و استفاده از روش‌های زمین‌آماري، مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که نتایج و آماره‌های ارزیابی به روش کوکریجینگ نشان داد، واریوگرام متغیر تصادفی شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی از مدل نمایی با اثر قطعه‌ای به ترتیب برابر (۰/۰۲) و (۰/۰۵) بود. همچنین، سقف واریوگرام برای متغیر WQI برابر (۰/۷۷) و برای متغیر کمکی هدایت الکتریکی برابر (۰/۸) بود. به دست آمد که نشان دهنده نقش موثر مؤلفه ساختاردار واریوگرام نسبت به مؤلفه بی‌ساختار آن است و استحکام ساختار فضایی منطقه برای هر دو متغیر تصادفی شاخص WQI و هدایت الکتریکی را بیان می‌کند. نتایج نشان داد، روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار و کوکریجینگ ساده، با مقدار ضریب تبیین ۰/۸۵ و مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۳/۲۷ برآورد دقیقی از متغیر تصادفی شاخص WQI دارد. بطور کلی می‌توان گفت ارزیابی به روش کوکریجینگ نشان داد، شاخص WQI در سطح منطقه عموماً در سطح صفر تا صد متغیر بوده و از نظر کیفی در محدوده "عالی" و "خوب" می‌باشد و بیش از ۹۶ درصد منطقه مورد مطالعه از کیفیت مناسبی برای مصارف شرب برخوردار است. نتایج این تحقیق نشان داد که برآوردهای زمین‌آماري در تعیین شاخص WQI در سطح مناطق، مخصوصاً در مناطقی که در آن‌ها، برداشت آب برای مصارف آشامیدنی انجام می‌شود به دلیل دقت بالای این روش، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱- مقدمه

که آنالیز کیفیت آب زیرزمینی و نمونه برداری آن به صورت نقطه به نقطه انجام می‌شود، لذا جهت پهنه‌بندی کیفیت آب، نیازمند ابزارهای جدید در قالب اطلاعات مکانی و روش‌های دقیق میان‌یابی می‌باشد که بتواند، ارزیابی کیفی آب زیرزمینی را به طور دقیق در سطح منطقه گسترش داده و امکان بهره برداری بهینه از منابع زیرزمینی را فراهم سازد. یکی از این ابزارها و روش‌ها، روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار و یا کریجینگ می‌باشد. زیرا در روش‌های تخمین کلاسیک از جمله روش تیسن موقعیت مکانی داده‌ها و جهت آن‌ها، در برآورد مقادیر متغیر تصادفی مد نظر قرار نمی‌گیرد [۴]. لیکن در زمین‌آمار و تخمین‌های مربوط به آن این دو فاکتور مورد توجه قرار می‌گیرد [۵]. از دیگر خصوصیات زمین‌آمار آن است که مقدار خطای تخمین را محاسبه نموده و همچنین قادر است مقدار خطای نمونه برداری و آماده‌سازی داده‌ها را محاسبه کرده و به این ترتیب شاخصی جهت برآورد استحکام ساختار فضایی و ارتباط مکانی داده‌ها را تعیین نماید [۶]. عبیدوی و هوشمند (۱۴۰۰) با تلفیق شاخص WQI و سیستم اطلاعات جغرافیایی،

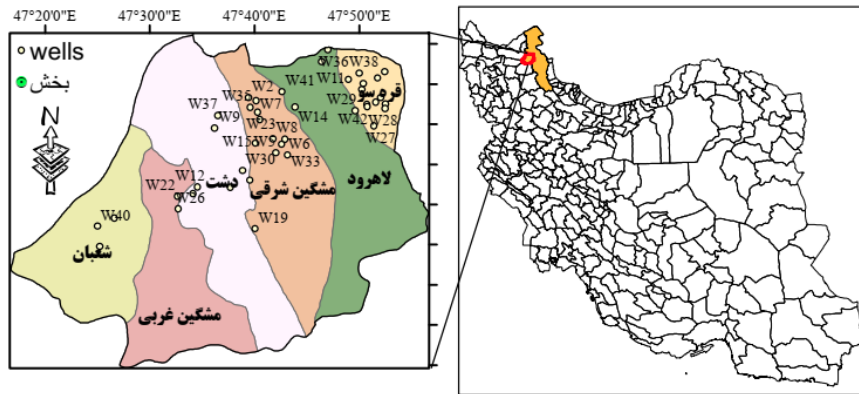
استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث کاهش سطوح ایستابی دشت‌ها و در نتیجه نشست زمین شده است [۱]. لذا، پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی بر گستره یک منطقه مطالعاتی، اولین قدم در برنامه‌ریزی منابع آب است. امروزه، با روی آوردن به استفاده از منابع آب زیرزمینی در اکثر نقاط خشک و نیمه‌خشک به دلیل خشکسالی‌های اخیر و از سوی دیگر، افزایش نفوذ فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی به منابع آب زیرزمینی و تکیه بیش از پیش، بر منابع آب زیرزمینی به عنوان منبع تأمین نیاز آبی بخش‌های کشاورزی، شرب، صنعت، سبب تغییر کیفیت این آب‌ها شده است [۲]. این مسئله، اکثر مناطق را با چالش‌های جدی در زمینه کمیت و کیفیت آبهای زیرزمینی مواجهه کرده است [۳]. شاخص‌های مختلفی جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب وجود دارد که یکی از این شاخص‌ها، شاخص استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WQI) می‌باشد. لیکن، از آنجا

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: y_hoseini@uma.ac.ir



الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی را در منطقه فیروزآباد بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که استفاده از روش‌های مکانی امکان شناسایی دقیق پهنه‌های بحرانی کیفیت آب را فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد، در بخش‌هایی از منطقه، مقادیر ۴ پارامتر کلسیم، کلرید، کدورت و سختی کل بیش از حد مجاز بوده و مقادیر دیگر پارامترها بر استانداردهای سازمان بهداشت جهانی منطبق می‌باشد. یافته‌های این پژوهش مبنای مناسبی برای توسعه مطالعات مبتنی بر زمین‌آمار در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی فراهم کرده است. حشمتی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۱) با استفاده از زمین‌آمار کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد را برای استفاده در کشاورزی بررسی کردند و از روش کریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی متغیرها استفاده نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده هم‌خوانی و همبستگی مشاهدات بود که حاکی از دقت خوب مدل‌های نیم‌تغیرنما و تخمین‌گر کریجینگ معمولی در میان‌یابی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد بود. در تحقیقی دیگر نخعی و ودیعی (۱۳۹۲)، کیفیت آب ۲۳ قنات استان تهران را با استفاده از منطق فازی برای مصارف مختلف شرب و کشاورزی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل استنتاج فازی، ابزاری مناسب جهت ارزیابی کیفیت آب قنات به شمار می‌رود. حسن‌علیپور و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیقی اثرات توسعه شهر اردبیل را بر کیفیت آب سطحی و زیرزمینی دشت اردبیل مورد ارزیابی قرار دادند و اظهار داشتند که در بخش‌های شمال، شمال‌شرق و شرق به طرف مرکز، جنوب و جنوب‌شرقی غلظت پارامترهای کیفیت آب افزایش یافته و علت آن را ناشی از کاهش کیفیت آب در اثر توسعه شهری عنوان نمودند. در تحقیقی که توسط ایمانی و جعفرزاده (۱۴۰۲) انجام شد، کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که تقریباً ۳۶ درصد آب زیرزمینی دشت از کیفیت مطلوب برای مصارف شرب برخوردار بوده و عموماً این مناطق در بخش مرکزی دشت واقع شده است و ۴۶ درصد منطقه، که عموماً در نواحی شمال و شمال شرقی دشت قرار دارند، از کیفیت مناسبی برای شرب برخوردار نمی‌باشند. ملکیان و میردشتوان (۱۳۹۲) با استفاده از داده‌های کیفی برداشت شده از ۴۱ حلقه چاه پیرومتری دشت هشتگرد، و به کمک روش‌های زمین آماری کریجینگ، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله، پارامترهای نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی را برای تعیین کیفیت آب آبیاری به روش ویلکاکس درون یابی کردند. نتایج نشان داد، ۹۹ درصد سطح آبخوان در رده خوب C_2S_1 و یک درصد از

سطح آبخوان در رده متوسط C_3S_1 قرار دارد. شیروانی و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از اطلاعات ۱۰ ساله کیفی آب‌های زیرزمینی دشت صحرای باغ استان فارس، علاوه بر بررسی شاخص خوردگی و شاخص رسوبگذاری آب منطقه با استفاده از یون‌های Ca , Mg , Na , K , HCO_3 و دیگر شاخص‌های وابسته مانند TDS , TH و SAR کیفیت آب زیرزمینی این دشت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها براساس شاخص لانژیر نشان‌داد، آب‌های زیرزمینی این منطقه دارای پتانسیل متوسط رسوبگذاری بوده و از نظر شاخص RSI از پتانسیل کم خوردگی برخوردارند. اسلامی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای، منابع آب زیرزمینی دشت کرمان را با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد که بخش اعظم دشت از نظر کیفیت آب برای مصارف شرب نامناسب بوده و نیاز به تصفیه دارد. در مطالعه دیگری حمیدیان و همکاران (۱۳۹۶)، کیفیت آب زیر زمینی استان بوشهر را با استفاده از شاخص جهانی کیفیت آب (WQI) مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد، روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در استان منفی بوده و کیفیت آب زیرزمینی منطقه به مرور زمان کاهش داشته است. بهرامی نسب و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از آنالیزهای ۱۶ ایستگاه در دشت رشکان از توابع تبریز، با استفاده از شاخص‌های SAR , K , Na , EC ، کیفیت آب زیرزمینی منطقه را بررسی نمودند و نتایج این تحقیق بیانگر عدم محدودیت از نظر SAR و محدودیت جدی از نظر شوری برای پهنه وسیعی از دشت بود. در تحقیق دیگری از آنالیز شیمیایی ۱۲ حلقه چاه واقع در دشت سیدان- فاروق از توابع مرو دشت شیراز برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شد [۱۶]. در این مطالعه، از نرم‌افزار RockWare AqQA برای تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی استفاده شد و همچنین پارامترهای SAR و خطر شوری برای طبقه‌بندی آب استفاده گردید. نتایج نشان داد استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌های مکانی، برای پهنه‌بندی کیفیت آب از دقت مناسب و بالایی برخوردار است. بانژاد و محبزه (۱۳۹۰)، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده کیفی آب ۴۹ چاه دشت رزن قهاوند، شامل هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، Ph ، کلرید، سدیم و نسبت جذب سدیم و پهنه‌بندی کیفی پارامترهای ذکرشده در بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای کشاورزی استفاده کردند. در پهنه‌بندی ارائه شده توسط آن‌ها، این دشت به سه ناحیه با کیفیت خوب، متوسط و ضعیف تقسیم بندی شد. شاخص‌های کیفیت آب (WQI) به‌عنوان ابزارهای تلفیقی، امکان تبدیل مجموعه‌ای از پارامترهای شیمیایی به یک معیار واحد برای ارزیابی کیفیت آب را فراهم می‌کنند. این شاخص‌ها در بسیاری از مطالعات هیدروژئوشیمیایی



شکل ۱. موقعیت دشت در استان اردبیل و چاه‌های مطالعاتی.

Fig. 1. Location of the plain in Ardabil province and study wells.

۲-۲- تئوری زمین‌آمار

روش میان‌یابی زمین‌آمار دارای خصوصیتی است، که سبب استفاده روز افزون از این روش در برآوردها شده است. به طور مثال، در روش‌های تخمین کلاسیک، موقعیت مکانی داده‌ها و جهت آن، در برآورد مقادیر متغیر تصادفی در منطقه مد نظر نبوده و ضریب داده‌ها برای تخمین به جهت و مکان آن داده‌ها وابسته نمی‌باشد ولی در زمین‌آمار این دو فاکتور مورد توجه قرار می‌گیرد. از دیگر خصوصیات زمین‌آمار آنست که مقدار خطای تخمین را محاسبه نموده و همچنین قادر است مقدار خطای نمونه برداری و آماده‌سازی داده‌ها را محاسبه نماید. مهم‌ترین مفاهیم زمین‌آمار شامل متغیر ناحیه‌ای^۱، نیم تغییر نما^۲، واریانس تخمین^۳ و روش تخمین می‌باشد [۱۸]. در واقع متغیر ناحیه‌ای به آن دسته از متغیرهای تصادفی گفته می‌شود که مقدار آن در هر مکان مستقل از مختصات آن نقطه بوده و تفاضل مقدار متغیر تصادفی در دو نقطه مختلف بستگی به فاصله آن دو نقطه دارد. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه را می‌توان به دو مؤلفه جزمی و تصادفی تجزیه کرد بنابراین می‌توان نوشت [۱۸]:

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

در رابطه فوق، $Z(x)$: مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای با مختصات (x) ،

برای تحلیل وضعیت منابع آب زیرزمینی به کار رفته‌اند. استفاده از روش‌های زمین‌آماري نیز امکان بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب و شناسایی مناطق بحرانی را فراهم می‌سازد. ترکیب این دو رویکرد می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به وضعیت کیفی آب زیرزمینی در مقیاس دشت ارائه دهد. با توجه به مطالب بیان شده و از آنجا که بررسی و پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی از اهمیت بالایی در اقتصاد و سلامت مناطق برخوردار است. در این تحقیق، کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مشگین شهر در شمال غربی شهرستان اردبیل، با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و شاخص WQI برای تخمین دقیق و نقطه به نقطه شاخص کیفیت آب در سطح دشت، از نظر مصارف شرب مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه

محدوده مورد مطالعه به وسعت ۱۷۰۵ کیلومتر مربع بخشی از اراضی دشت مشگین در شهرستان مشگین شهر، در حدود ۹۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان اردبیل قرار گرفته است. راه دسترسی اراضی از طریق جاده اردبیل - مشگین شهر می‌باشد. ارتفاع اراضی ۳۵۷ تا ۲۵۴۱ متر از سطح دریا متغیر است. این منطقه با متوسط بارندگی سالانه ۴۸۴/۶ میلیمتر و دمای متوسط سالانه ۱۰ درجه سانتیگراد طبق روش آمبرژه، اقلیم نیمه مرطوب معتدل و طبق روش دومارتن اقلیم نیمه خشک دارد. در این مطالعه کیفیت آب ۴۲ نمونه آب زیرزمینی دشت مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱) نمای دشت مذکور و نقاط نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد.

1. Regionalized variable
2. Semivariogram
3. Estimation variance

نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. وزن‌های هر پارامتر براساس تأثیر آن بر کیفیت آب به آن اختصاص داده می‌شود. شاخص کیفی آب با استفاده از روش پیشنهادشده توسط دردور و همکاران (۲۰۲۱)، به این صورت محاسبه می‌شود که در مرحله اول، وزن W_i را برای هر یک از دوازده پارامتر فیزیکوشیمیایی، با توجه به اهمیت نسبی آن در کیفیت کلی آب برای اهداف آشامیدنی اختصاص داده می‌شود. پارامترها و مقادیراوزان آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که در جدول مشخص است، به نیترات، نیتريت و کل املاح محلول، حداکثر وزن ۵ داده شده است و وزن واحد به منبیزیم اختصاص داده شده است، زیرا به‌ندرت نقش مهمی در کیفیت آب زیرزمینی ایفا می‌کند. به همین ترتیب، وزن‌های بین ۱ تا ۵ به سایر پارامترها اختصاص داده شده است. در مرحله دوم، وزن نسبی از رابطه زیر برای پارامترها، محاسبه می‌شود.

$$W_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (4)$$

که در این رابطه W_i : وزن هر پارامتر، W_i وزن نسبی و n تعداد پارامترهاست.

در مرحله سوم، یک مقیاس رتبه‌بندی کیفیت (q_i) برای هر پارامتر با استفاده از رابطه زیر اختصاص داده می‌شود.

$$q_i = \frac{C_i - C_{ip}}{S_i - C_{ip}} \times 100 \quad (5)$$

که در این رابطه: q_i رتبه کیفی است. C_i غلظت پارامتر شیمیایی هر نمونه آب Si (mg/L): استاندارد آب آشامیدنی برای هر پارامتر شیمیایی (mg/L) و C_{ip} : مقدار ایده‌آل هر پارامتر شیمیایی در آب خالص که برای تمام پارامترها صفر در نظر گرفته می‌شود به جز pH که مقدار آن برابر ۷ است. در نهایت شاخص کیفی آب (WQI)، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. که با در نظر گرفتن حدود جدول (۲)، کیفیت آب از لحاظ شرب طبقه‌بندی می‌شود.

$$WQI = \sum_{i=1}^N q_i \times W_i \quad (6)$$

$m(x)$: مؤلفه جزیی متغیر ناحیه‌ای و $y(x)$: مؤلفه تصادفی متغیر ناحیه‌ای می‌باشد.

نیم تغییر نما همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده را با توجه به فاصله و جهت آن‌ها نشان می‌دهد. مقدار نیم تغییر نما به شرح زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (2)$$

در رابطه فوق، $n(h)$: تعداد جفت نمونه‌های به‌کار رفته در محاسبات به ازای هر فاصله h است، بنابراین تعداد جفت‌ها تابع h است که معمولاً با افزایش h تعداد جفت‌ها کم می‌شود و $Z(x+h)$ و $Z(x)$ مقدار متغیر در دو نقطه به مختصات (x) و $(x+h)$ است که به فاصله h از هم قرار دارند. واریانس تخمین که با نماد $\sigma^2 E$ نشان داده می‌شود، نشانگر واریانس خطای بین مقدار حقیقی و مقدار تخمینی یک متغیر است. توانایی محاسبه واریانس تخمین، یکی از مهم‌ترین نقاط قوت زمین‌آمار است. با داشتن میانگین و واریانس خطای تخمین می‌توان حدود اطمینان یک تخمین را محاسبه کرد. کریجینگ یک روش تخمین زمین‌آمار است که با استفاده از مقادیر معلوم و یک تغییر نما، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. این روش بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار می‌باشد و می‌توان گفت که بهترین تخمینگر خطی نا ارب است [۱۹]. رابطه کلی تخمین کریجینگ بصورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

در رابطه فوق، $Z(x_i)$: مقدار مشاهده شده Z در نقطه i : وزن یا اهمیت نسبت داده شده به مقدار Z در نقطه و $Z^*(x)$: مقدار تخمین زده شده Z در نقطه x می‌باشد.

۲-۳- شاخص کیفی آب (WQI)

شاخص کیفی شاخص کیفی آب (WQI) به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای اهداف شرب در مناطق مختلف جهان استفاده می‌شود. مقدار WQI بر اساس تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی

جدول ۱. وزن و اوزان نسبی شاخص های کیفی آب در روش WQI [۲۱].

Table 1. Weights and relative weights of water quality indicators in the WQI method [21].

وزن نسبی RW _i	وزن W _i	واحد	پارامتر شیمیایی
۰/۰۹	۴	-	pH
۰/۱۳	۴	μS/cm	EC
۰/۱۱	۵	mg/L	TDS
۰/۱۱	۲	mg/L	TH
۰/۰۸	۲	mg/L	Ca ²⁺
۰/۰۸	۱	mg/L	Mg ²⁺
۰/۰۸	۳	mg/L	Na ⁺
۰/۱	۳	mg/L	Cl ⁻
۰/۰۶	۴	mg/L	So ₄ ²⁻
۰/۱	۳	mg/L	HCo ₃
۰/۰۶	۲	mg/L	K ⁺
۱	۳۴	-	مجموع

جدول ۲. طبقه بندی کیفیت آب در روش WQI [۲۲].

Table 2. Water quality classification in the WQI method [22].

بیشتر از ۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	کمتر از ۵۰	محدوده شاخص
نامناسب	بسیار ضعیف	ضعیف	خوب	عالی	وضعیت آب

۲-۴- معیارهای ارزیابی مدل

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \quad (۸)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i| \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (۱۰)$$

برای ارزیابی روش کریجینگ، از آماره های ریشه ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ε)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تبیین (R²)، و بهره وری مدل (EF) استفاده می گردد. بهترین پیش بینی ها زمانی رخ می دهد که آماره های ME، RMSE، ε و MAE به صفر و EF و R² به یک میل نمایند. روابط (۷) الی (۱۱) معادلات آماره های مذکور را نشان می دهند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2} \quad (۷)$$

جدول ۳. مشخصه های آماری مؤلفه های مختلف شیمیایی.

Table 3. Statistical characteristics of various chemical components.

SO ₄ (meq/L)	Cl (meq/L)	CO ₃ (meq/L)	HCO ₃ (meq/L)	K (meq/L)	Na (meq/L)	Mg (meq/L)	Ca (meq/L)	PH	T.D.S (mg/L)	EC (μS/cm)	پارامتر
۳/۱۱	۲/۱۲	۰/۱۹	۰/۶۶	۰/۰۹	۳/۶۱	۱/۹۶	۳/۲۱	۷	۶۲۲	۸۶۷	میانگین حسابی
۲/۰۲	۱/۰۱	۰/۶۷	۱/۰۸	۰/۰۷	۲/۲۲	۰/۷۶	۱/۰۱	۰/۴۷	۲۶۵	۳۸۵	انحراف معیار
۶۴/۹	۴۷/۶	۳۵۲	۲۹/۵	۷۷/۷	۶۱/۵	۳۸/۷	۳۱/۴	۶/۶	۴۲/۶	۴۲/۸	(درصد) ضریب تغییرات
۱۰	۵	۲/۵	۶	۰/۲	۱۱	۳/۵	۵/۴	۸	۱۴۶۰	۲۱۴۰	حداکثر
۰/۷	۱	۰	۲/۲	۰	۱/۱	۰/۹	۱/۳	۵/۸	۲۹۱	۴۱۷	حداقل
۴	۱/۵	۰	۳	۰/۱	۴	۲	۲/۵	۶/۹	۷۲۰	مد ندارد	مد
۲/۷	۱/۶	۰	۳/۵	۰/۱	۳	۱/۹	۳	۷	۵۹۱	۸۴۵	میانه
۹/۳	۴	۲/۵	۳/۸	۰/۲	۹/۹	۲/۶	۴/۱	۰/۲	۱۱۶۸	۱۷۲۳	دامنه تغییرات
۱/۷	۱/۰۷	۳/۴۵	۰/۶	۰/۳۳	۱/۶۵	۰/۵۹	۰/۳۵	-۰/۵۵	۱/۴	۱/۴۵	چولگی
۴/۰۸	۱/۰۳	۰/۴۵	۱/۶۱	۰	۴/۹۵	۰/۵۷	۱/۰۲	۰/۲۲	۷۰۶۷۳	۱۴۸۵۱۳	واریانس

شیمیایی متأثر از فرآیند تبادل یونی تهیه گردید. در شکل ۳ نمودار دو متغیره Ca+Mg در مقابل HCO₃+SO₄ نمایش داده شده است. خط ۱:۱ نشان دهنده فرآیندهای انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس می باشد. بیشتر نمونه های آب زیرزمینی در اطراف خط ۱:۱ قرار نگرفته اند، این امر نشان دهنده عدم انحلال کانی ژپس در دشت می باشد. همچنین در شکل ۳ نمودار دو متغیره Na / Cl در مقابل EC برای نمونه های آب زیرزمینی ارائه گردیده است. نمونه هایی که در بالای خط Na / Cl = 1 واقع شده اند، منشأ دوگانه دارند. با توجه به این نمودار، در همه نمونه های آب زیرزمینی رخداد فرایند تبادل یونی مشاهده می شود.

نتایج طبقه بندی هیدروشیمیایی آب های زیرزمینی در تعدادی از چاه های منطقه نشان داد که رخساره های غالب منطقه شامل تیپ های بی کربناته - کلسیک و بی کربناته - سدیک هستند (جدول ۴). در بیشتر نمونه ها، یون بی کربناته به عنوان آنیون غالب مشاهده شد که بیانگر تأثیر فرآیند هوازدگی و انحلال کانی های کربناته در تغذیه آبخوان است. در مقابل، در تعدادی از نقاط نظیر فخرآباد، دده بیگلر، چقان، جلاپر، آق درق و جیدرق، رخساره سولفات مشاهده شد که می تواند نشان دهنده نقش انحلال کانی های سولفات نظیر ژپس و انیدریت در ترکیب شیمیایی آب باشد. غلبه یون های کلسیم و سدیم در بین کاتیون ها نیز بیانگر مراحل مختلف تکامل شیمیایی آب زیرزمینی و وقوع فرآیندهای تبادل یونی در بخش هایی از آبخوان است. بررسی تیپ و رخساره آب نشان داد که اکثر نمونه ها در محدوده توسعه انتقالی قرار دارند

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (11)$$

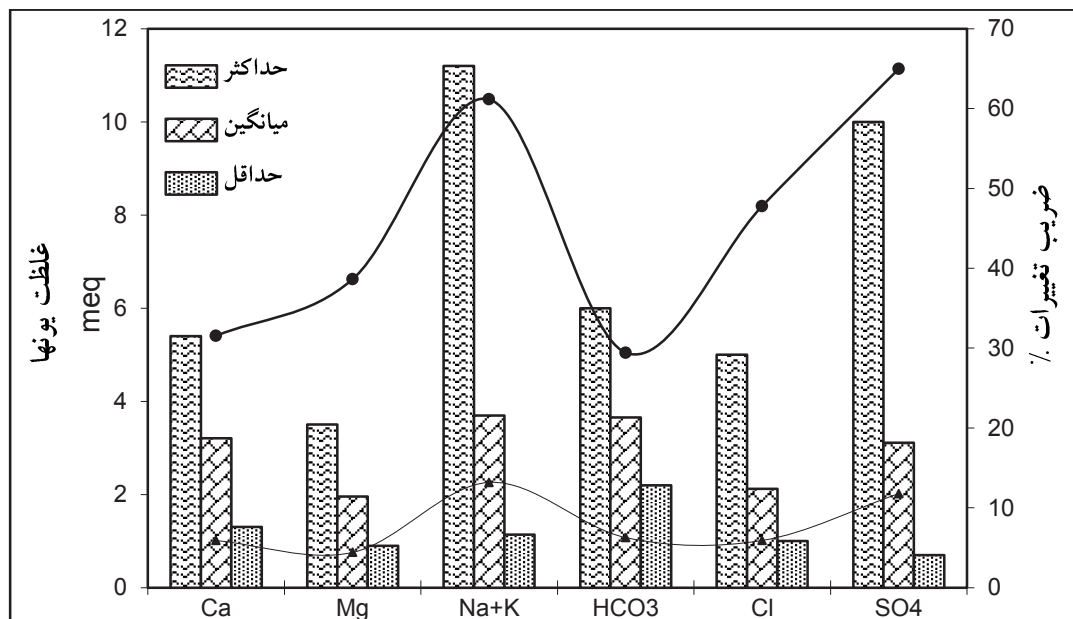
در روابط فوق، N: تعداد نمونه، P_i: مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، Q_i: مقادیر واقعی، : میانگین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، $\bar{Q}$: میانگین مقادیر واقعی می باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی آماری نتایج کیفیت نمونه های آب زیرزمینی

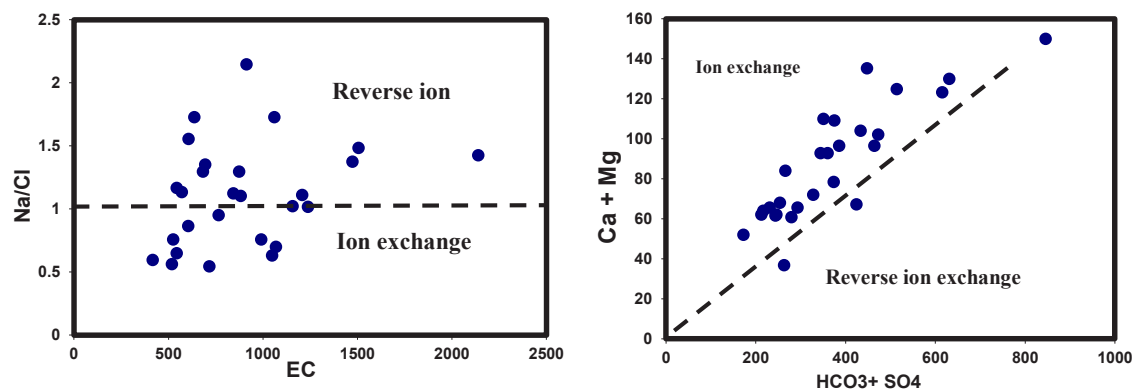
در جدول ۳ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه آب، از لحاظ آماری ارائه شده است. کمترین و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی نمونه آب چاه ها به ترتیب برابر با ۴۱۷ و ۲۱۴۰ میکروموس بر سانتیمتر می باشد. همانطور که نتایج نشان می دهد، کیفیت آب در دشت مشگین به علت آبشویی اراضی کشاورزی و نفوذ به آب زیرزمینی مناسب نمی باشد. در شکل ۲، نمودار نمایه های آماری نمونه های آب زیرزمینی ارائه شده است. با توجه به این شکل، یون های سولفات، سدیم و پتاسیم تغییرات زیادی را در منطقه مورد مطالعه نشان می دهند.

برای تعیین فرآیندهای تبادل یونی و تبادل یونی معکوس در سفره آبدار دشت مشگین دو نمودار ترکیبی با استفاده از توابع بین متشکله های



شکل ۲. نمایه‌های آماری نمونه‌های آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 2. Statistical profiles of groundwater samples from the Meshgin Plain.



شکل ۳. نمودارهای دو متغیره یون‌های مرتبط با تبادل یونی.

Fig. 3. Bivariate diagrams of ions related to ion exchange.

۳-۲- نقشه‌های هم‌ارزش پارامترهای موثر بر کیفیت آب زیرزمینی در این بخش جهت بررسی توزیع مکانی متشکله‌های شیمیایی آب زیرزمینی دشت مشگین اقدام به تهیه نقشه‌های هم‌میزان پارامترهای مختلف گردید و نقشه‌های هم‌ارزش مجموع املاح و یون‌های اصلی با استفاده از نتایج آنالیز نمونه‌برداری تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. در اشکال ۴ تا ۸، تعدادی از منحنی‌های هم‌ارزش پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت آب

که بیانگر تغییر تدریجی کیفیت شیمیایی آب در مسیر جریان زیرزمینی است. همچنین حضور همزمان رخساره‌های کلسیک و سدیک نشان‌دهنده ناهمگنی شرایط زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی در سطح دشت است. به طور کلی، نتایج حاکی از آن است که فرآیندهای انحلال سنگ‌های کربناته و تبخیری، همراه با تبادل یونی، از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه محسوب می‌شوند [۲۴]، [۲۵].

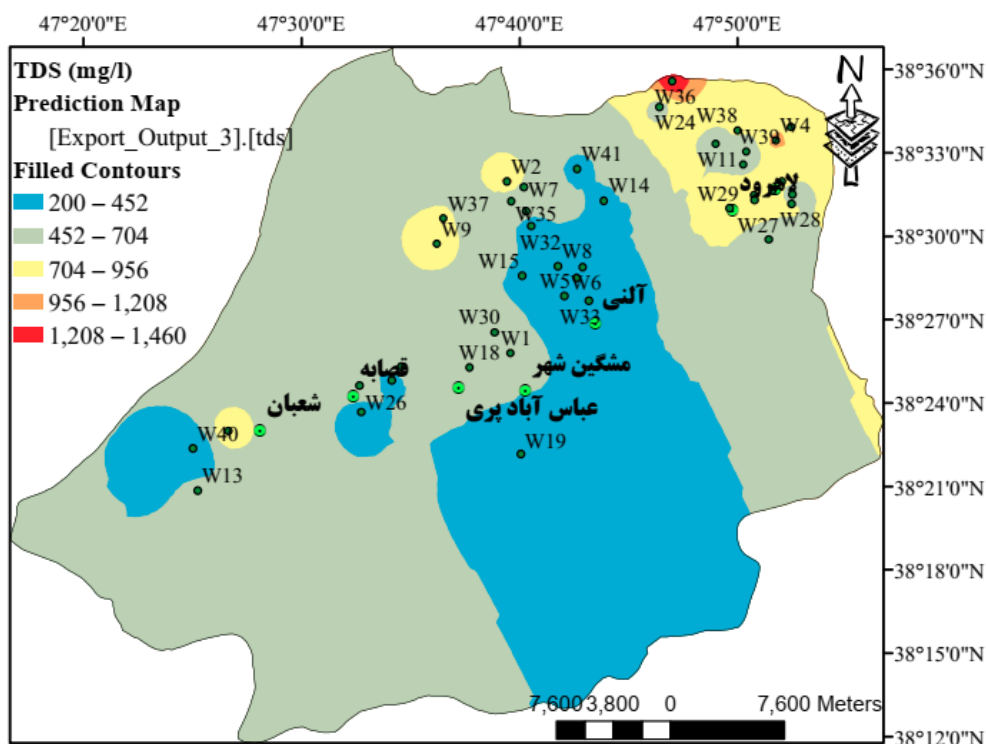
جدول ۴. تیپ و رخساره نمونه‌های آب زیرزمینی.

Table 4. Type and facies of groundwater samples.

محل نمونه‌برداری	غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره	نحوه توسعه
انار	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
دره بیگلر	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
زیرزمین	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
سولاخو	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
سواره	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
عربلو	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
فخرآباد	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
قورت تپه	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
قره درویش	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
اهالی قریه لحاق	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
میرکندی	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
احمدبیگلر	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
گلر	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
دده بیگلر	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} = > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
مرغداری کریمی	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
لاهرود	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
نصیرآباد	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
چپقان	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
جلایر	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
آلنی	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
پورتقی	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
آلنی کارخانه کبریت	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
آق درق	$\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	سولفاته	کلسیک	سولفاته کلسیک	توسعه انتقالی
بیجق	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه مخلوط
جبدرق	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
دوشانلو	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی

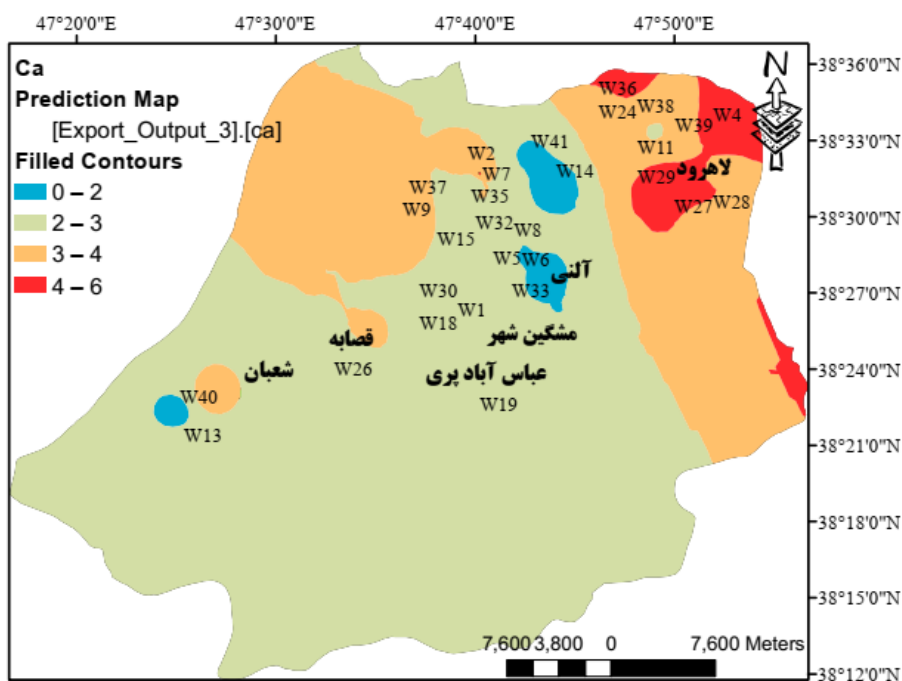
این موضوع انحلال بیشتر کانی‌های حاوی کلسیم مانند ژئیس در مسیر جریان آب زیرزمینی است. همچنین نقشه هم مقدار منیزیم دشت مشگین در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار منیزیم در بخش شمال شرقی منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. مقدار منیزیم در این بخش بین ۲/۵ تا ۳/۵ (میلی‌اکی والان گرم در لیتر) است. بطور کلی منیزیم از سمت جنوب و مرکز به سمت شمال

را بر اساس شاخص WQI نشان داده شده است. منحنی‌های هم ارزش مجموع املاح محلول در شکل ۴ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، مقدار املاح آب زیرزمینی از سمت جنوب به سمت شمال شرق دشت افزایش می‌یابد. در شکل ۵ نقشه هم مقدار یون کلسیم نمونه‌های آب زیرزمینی نشان داده شده است. با توجه به این شکل غلظت کلسیم از بخش شمالی به سمت جنوب و غرب دشت کاهش می‌یابد. علت



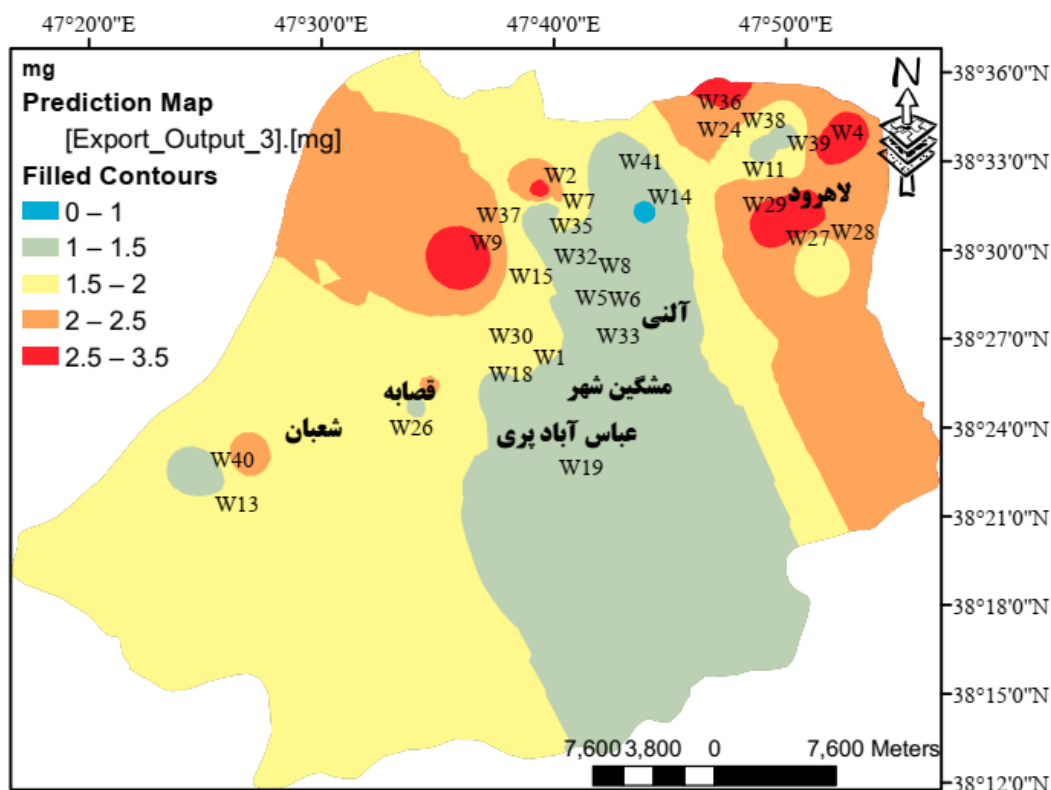
شکل ۴. نقشه هم ارزشی مجموع املاح آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 4. Map of the total solute value of groundwater in the Meshgin Plain.



شکل ۵. نقشه هم ارزشی کلسیم آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 5. Calcium isovalue map of groundwater in the Meshgin Plain.



شکل ۶. نقشه هم ارزش منیزیم آب زیرزمینی دشت مشگین.

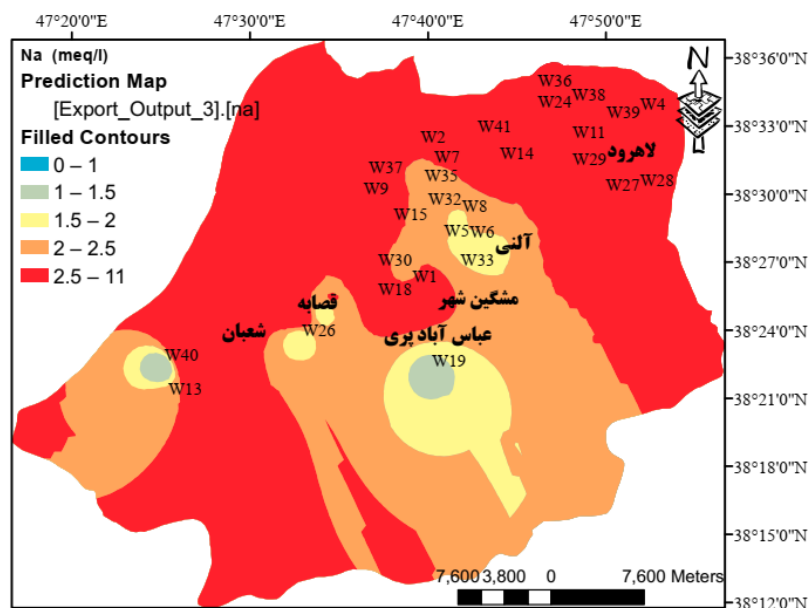
Fig. 6. Map of magnesium isovalue of groundwater in the Meshgin Plain.

روش WQI در نقشه های هم ارزش و روی هم قرارگیری نقشه های مذکور و تعیین شاخص WQI در منطقه، از آنجا که جهت برآورد شاخص WQI به روش کوکیرجینگ نیاز به داده های با توزیع نرمال می باشد، نخست منحنی فراوانی داده های شاخص WQI و هدایت الکتریکی به عنوان متغیر کمکی، در سطح منطقه محاسبه شد، از آنجا که توزیع نرمال داده ها، می بایست دارای چولگی صفر و کشیدگی ۳ باشد، به منظور بررسی پیش فرض نرمال بودن داده ها، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی انجام شد. نتایج نشان داد که هر دو متغیر در سطح احتمال ۵ درصد از توزیع نرمال قابل قبولی برخوردار هستند ($P>0.05$). با این وجود، به منظور کاهش اثر چولگی مثبت و بهبود پایداری مدل واریوگرام، تبدیل لگاریتمی نیز مورد بررسی قرار گرفت که موجب نزدیک تر شدن توزیع داده ها به حالت نرمال گردید. به منظور بررسی نرمال بودن داده های شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نتایج جدول ۵ نشان داد که هر دو متغیر قبل و بعد از تبدیل لگاریتمی دارای توزیع نرمال قابل قبول هستند.

و شمال شرق دشت افزایش می یابد، این مناطق در محدوده بخش لاهرود قرار دارد. در شکل ۷، نقشه هم مقدار سدیم نشان داده شده است، همان طور که در این شکل مشاهده می شود، مقدار سدیم از سمت جنوب به سمت شمال دشت افزایش می یابد. در شکل ۸، نقشه هم ارزش یون سولفات نمونه های آب زیرزمینی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می گردد، مقدار سولفات به سمت شمال شرقی در منطقه مورد مطالعه افزایش می یابد. با توجه به اینکه رسوبات آبرفتی نیز دارای کانی ژپس می باشند، بنابراین افزایش غلظت سولفات در این نواحی نسبت به بقیه مناطق دشت پذیرفتنی است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود حداکثر غلظت سولفات در شمال شرقی در محدوده ۸ تا ۱۰ (میلی اکی والان گرم در لیتر) است.

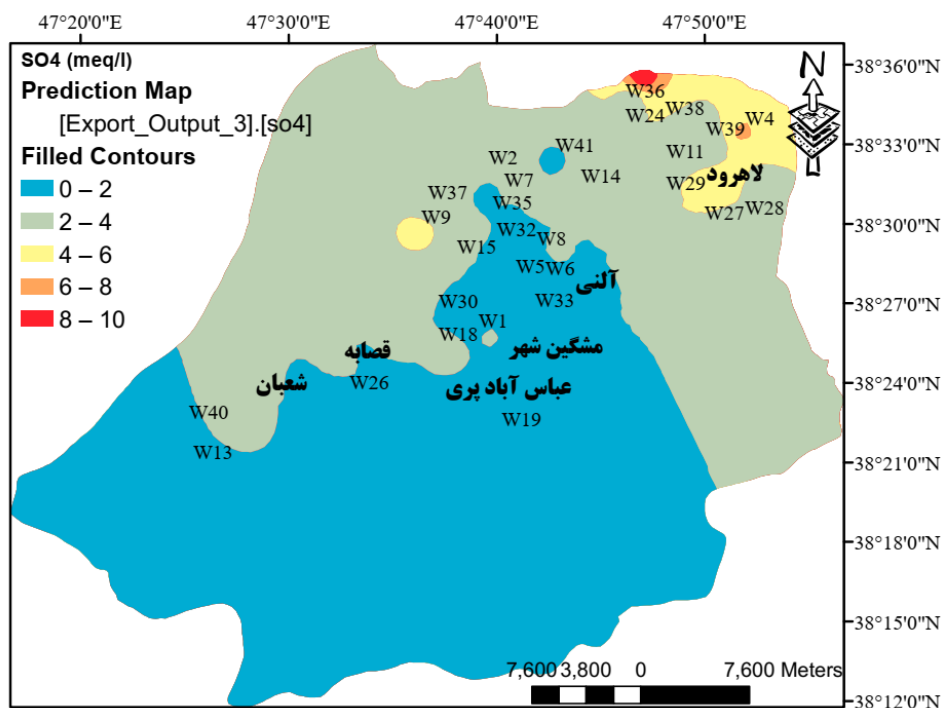
۳-۳- ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص WQI و روش زمین آمار

پس از اعمال ضرایب وزنی پارامترهای موثر بر کیفیت آب زیرزمینی به



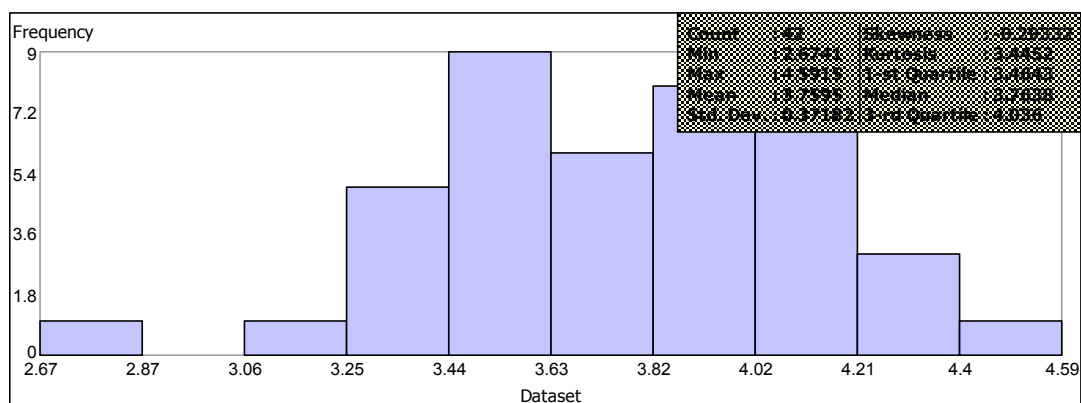
شکل ۷. نقشه هم ارزش سدیم آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 7. Map of sodium isovalue of groundwater in the Meshgin Plain.



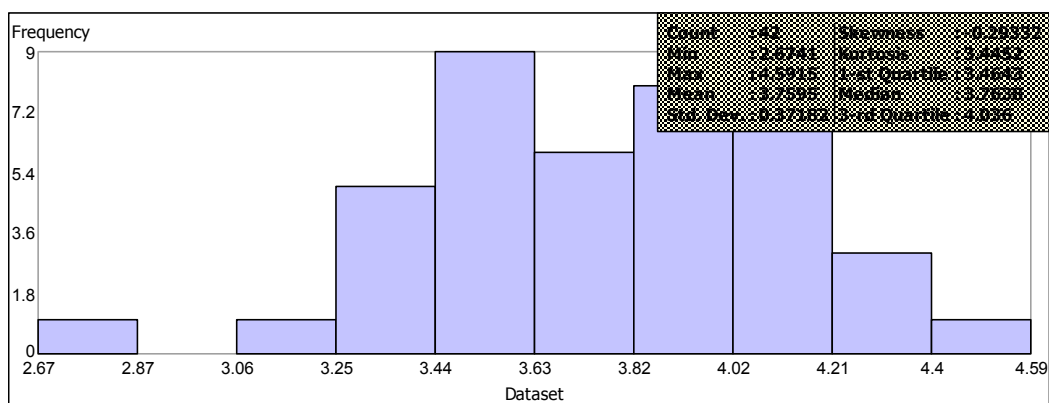
شکل ۸. نقشه هم ارزش سولفات آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 8. Map of sulfate isovalues of groundwater in the Meshgin Plain.



شکل ۹. نمودار فراوانی شاخص WQI تبدیل شده.

Fig. 9. Frequency chart of the converted WQI index.



شکل ۱۰. نمودار فراوانی متغیر کمکی هدایت الکتریکی تبدیل شده.

Fig. 10. Frequency plot of the transformed electrical conductivity auxiliary variable.

سپس بهترین واریوگرام این شاخص که دارای کمترین اثر قطعه ای بود انتخاب گردید، برای برآورد شاخص WQI نیز پس از نرمال سازی و حذف روند داده ها، نیم تغییرنا منطقه تعیین گردید این واریوگرام از مدل نمایی^۲ با میزان اثر قطعه ای^۳ (۰/۰۲) برای شاخص WQI و (۰/۰۵) برای متغیر کمکی هدایت الکتریکی و سقف واریوگرام^۴ (۰/۷۷) برای متغیر WQI، و (۰/۸) برای متغیر کمکی هدایت الکتریکی، به دست آمد. با توجه به این اعداد، از آنجا که نسبت اثر قطعه ای به سقف واریوگرام در هر دو متغیر، بسیار کوچکتر از ۰/۵ می باشد، می توان نتیجه گرفت که نقش مؤلفه ساختاردار

با این وجود، به منظور کاهش میزان چولگی و بهبود پایداری مدل های زمین آماری، تبدیل لگاریتمی داده ها نیز مورد استفاده قرار گرفت. برای این کار از روش های تبدیل توزیع غیر نرمال به نرمال در نرم افزار Gis10.4 و افزونه تحلیل زمین آماری^۱ استفاده شد لذا با استفاده از روش لوگ نرمال، توزیع داده ها به توزیع نرمال نزدیک شد (اشکال ۹ و ۱۰). سپس با دادن مختصات UTM نقاط به نرم افزار وجود یا عدم وجود روند در داده ها بررسی گردید که وجود روند در داده ها در جهات X و Y مشاهده گردید، لذا از آنجا که در تخمین به روش کوکریجینگ می بایست روند را از داده ها حذف نمود، لذا در مرحله بعد روند داده ها حذف گردید (اشکال ۱۱ و ۱۲).

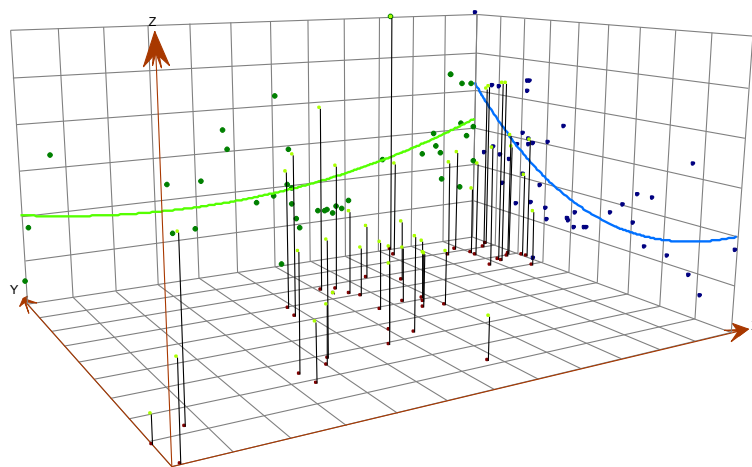
2. Exponential
3. Nugget
4. Sill

1. Geostatistical Analysis

جدول ۵. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن داده‌های WQI و هدایت الکتریکی قبل و بعد از تبدیل لگاریتمی.

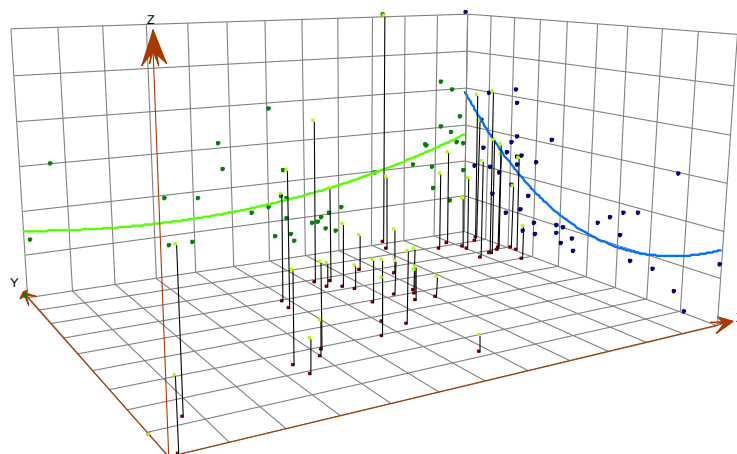
Table 5. Results of the Kolmogorov–Smirnov test to check the normality of WQI and electrical conductivity data before and after logarithmic transformation.

متغیر	وضعیت داده	تعداد نمونه	آماره K-S	مقدار P	نتیجه
(EC)	قبل از تبدیل	۴۲	۰/۱۰۶	۰/۶۸۹	نرمال
	بعد از تبدیل لگاریتمی		۰/۰۷۹	۰/۹۳۴	نرمال
(WQI)	قبل از تبدیل	۴۲	۰/۱۱۲	۰/۶۲۸	نرمال
	بعد از تبدیل لگاریتمی		۰/۰۹۸	۰/۷۸	نرمال



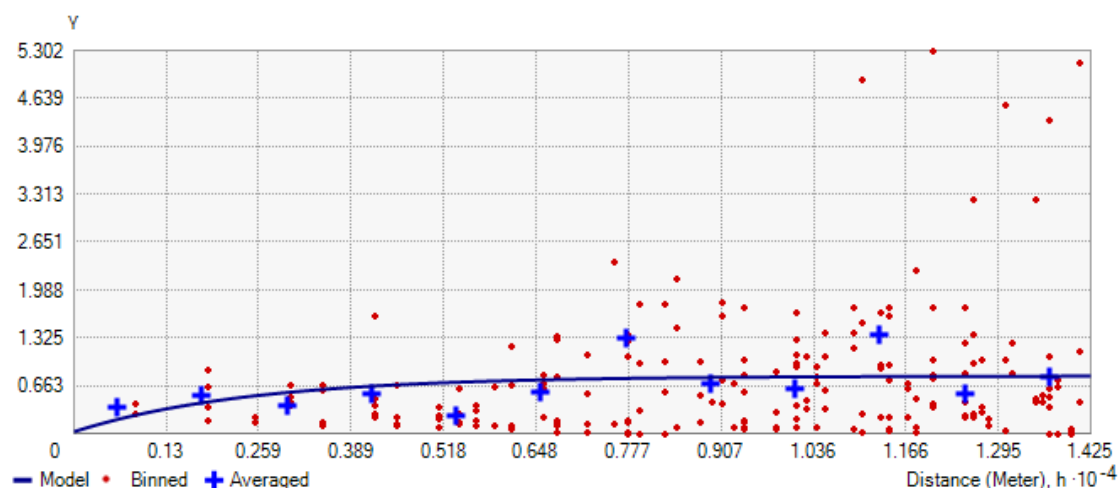
شکل ۱۱. وجود روند در راستای محورهای x,y برای شاخص WQI.

Fig. 11. The existence of a trend along the x,y axes for the WQI index.



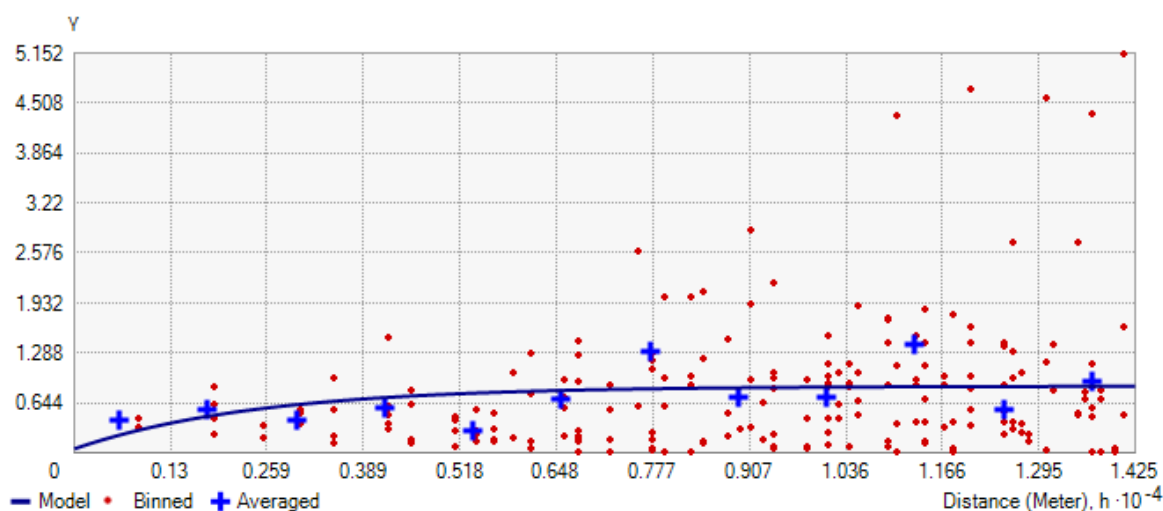
شکل ۱۲. وجود روند در راستای محورهای x,y برای شاخص کمکی هدایت الکتریکی.

Fig. 12. The existence of a trend along the x,y axes for the auxiliary index of electrical conductivity.



شکل ۱۳. سمیواریوگرام بدست آمده در روش کریجینگ ساده برای متغیر WQI.

Fig. 13. Semivariogram obtained in the simple kriging method for the WQI variable.

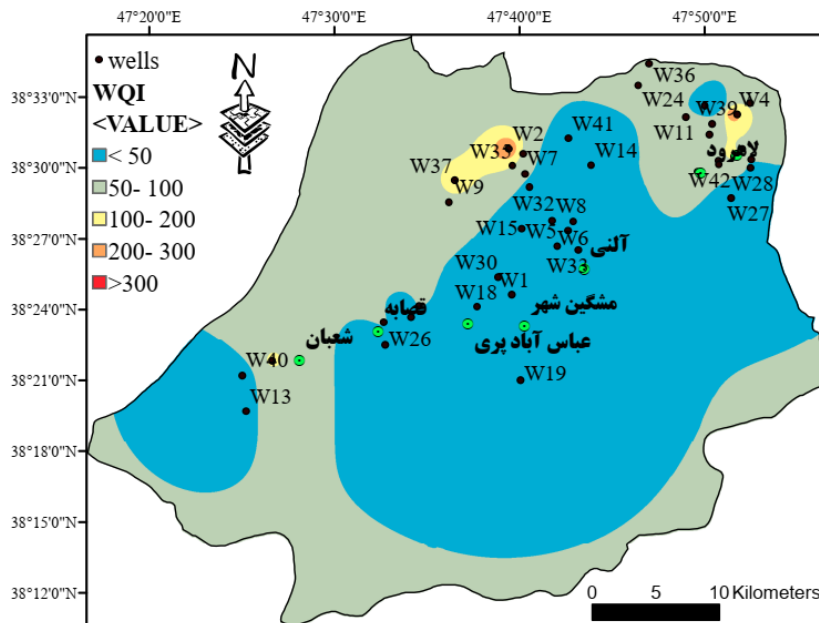


شکل ۱۴. سمیواریوگرام بدست آمده در روش کریجینگ ساده برای متغیر کمکی هدایت الکتریکی.

Fig. 14. Semivariogram obtained in the simple kriging method for the auxiliary variable of electrical conductivity.

که عوامل زمین‌شناسی و هیدروژئوشیمیایی نقش اصلی را در کنترل پراکنش فضایی کیفیت آب ایفا می‌کنند. در نتیجه، اعمال روش‌های زمین‌آمار برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات مکانی WQI در این دشت از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است. این موضوع دقت نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب را افزایش داده و امکان مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌سازد. با وجود مناسب بودن تعداد جفت داده‌ها برای تحلیل نیم‌تغیرنما، افزایش تعداد

واریوگرام بیش از نقش مؤلفه بی‌ساختار آن است و این نشان‌دهنده استحکام ساختار فضایی منطقه می‌باشد. در اشکال ۱۳ و ۱۴ سمی واریوگرام شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار فضایی کیفیت آب در منطقه از پایداری مناسبی برخوردار بوده و تغییرات مکانی WQI به‌صورت تصادفی و بدون الگوی مشخص رخ نمی‌دهد. وجود ساختار مکانی قوی در داده‌ها بیانگر این است



شکل ۱۵. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص WQI و روش کوکریجینگ ساده.

Fig. 15. Assessment of groundwater quality in the region using the WQI index and the simple co-kriging method.

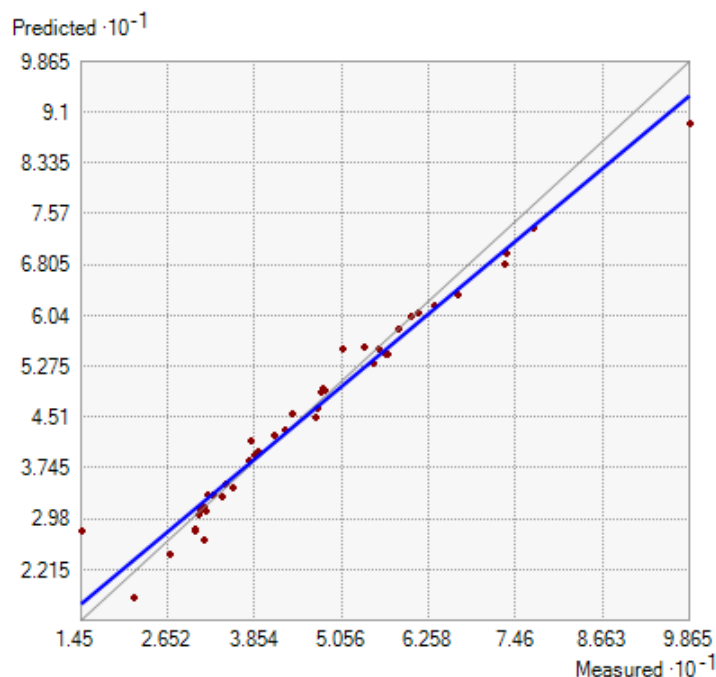
به صفر محاسبه گردید، برآوردهای دقیقی از متغیرهای ناحیه‌ای انجام شد. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، وجود منطقه‌ای با کیفیت آب زیرزمینی «عالی» برای شرب در قسمت مرکزی دشت در قسمت مشگین شهر و عباس آباد پری و همچنین غرب دشت، در ناحیه قصابه مشاهده می شود، در سایر مناطق دشت، کیفیت آب زیرزمینی از نظر شاخص WQI غالباً «خوب» طبقه بندی شده است.

جدول ۶ طبقه بندی مساحت دشت را بر اساس شاخص کیفیت WQI را نشان می دهد و جدول ۷ نیز شاخص‌های کمی ارزیابی مدل را بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، درصد خطای نسبی (E)، ضریب تعیین (R^2) و بازده مدل (EF) نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۷ به وضوح نشان داده شده است، روش‌های مبتنی بر زمین آمار و مدل کوکریجینگ ساده، با مقدار ضریب تبیین ۰/۸۵ و مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۳/۲۷ دارای برازش و برآورد دقیقی از متغیر تصادفی شاخص WQI می‌باشد. این دقت برآورد از مطالعات انجام شده توسط اقیار و همکاران (۲۰۰۷) با مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۰/۴ و ضریب تبیین برابر ۰/۶ بیش‌تر است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر فرآیندهای هوازدگی

نقاط نمونه‌برداری در مطالعات آتی می‌تواند موجب بهبود پایداری واریوگرام و کاهش عدم قطعیت تخمین‌های مکانی شود.

در نهایت برآورد داده‌ها جهت تعیین بهترین نوع کوریجینگ، به روش‌های مختلف کوکریجینگ ساده^۱، کوکریجینگ معمولی^۲ و کوکریجینگ عمومی^۳ صورت گرفت و با توجه به نتایج دقیق‌تر کوکریجینگ ساده، این مدل برای تخمین استفاده شد، در شکل ۱۵ پراکنش شاخص WQI با استفاده از روش کوکریجینگ ساده در سطح منطقه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۶ روش اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی تخمین شاخص WQI ارائه شده است. همانطور که در تصویر مشخص است، نشان می دهد که مدل کوکریجینگ ساده از قابلیت خوب و دقت بالایی در پیش‌بینی شاخص WQI برخوردار است، که با نتایج کاستلینی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد، ایشان در مطالعه ای نشان داد با محاسبه نسبت آستانه به ثر قطعه‌ای بیش از ۶۰ درصد، که نشان دهنده ساختار فضایی قوی متغیر ناحیه‌ای در منطقه است، می‌توان برآوردهای دقیقی از متغیر ناحیه‌ای ارائه داد در تحقیق حاضر نیز به دلیل آنکه اثر قطعه ای برای دو متغیر ناحیه ای مقدار نزدیک

1. Simple Co-kriging
2. Ordinary Co-kriging
3. Universal Co-kriging



شکل ۱۶. روش اعتبار سنجی متقابل جهت ارزیابی روش کو کریجینگ ساده.

Fig. 16. Cross-validation method for evaluating the simple co-kriging method.

WQI و EC در این مطالعه، بیانگر وجود یک ساختار فضایی بسیار قوی و پیوسته است؛ به گونه‌ای که بخش عمده تغییرات کیفیت آب زیرزمینی ناشی از فرآیندهای ساختاری و قابل تفسیر بوده و نقش نوسانات تصادفی حداقلی است. این یافته با نتایج کاستلینی و همکاران (۲۰۱۹) که وجود ساختار فضایی قوی را عامل اصلی افزایش دقت مدل‌های زمین‌آماري معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد، با این تفاوت که شدت پیوستگی مکانی در دشت مشکین در سطح بالاتری نسبت به بسیاری از مناطق گزارش شده در مطالعه ایشان قرار دارد. همچنین نسبت اثر قطعه‌ای به سقف واریوگرام در این تحقیق به مراتب کمتر از مقادیر گزارش شده توسط چاوهران و همکاران (۲۰۲۲) و آدی‌مالا و چیان (۲۰۲۱) است که نشان می‌دهد استفاده از متغیر کمکی مناسب نظیر هدایت الکتریکی می‌تواند به‌طور مؤثری عدم قطعیت برآورد شاخص WQI را کاهش داده و نقش مؤلفه ساختاردار را در مدل‌سازی فضایی تقویت کند. از نظر دقت مدل، مقدار بالای ضریب تعیین ($R^2 = 0.85$) و مقدار نسبتاً پایین RMSE (حدود ۳/۲۷) در این پژوهش، عملکرد بهتری را نسبت به اغلب مطالعات مبتنی بر کریجینگ معمولی یا WQI کلاسیک نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که در پژوهش‌های آدیمالا و چیان (۲۰۲۱) و یاداو و همکاران (۲۰۲۳) مقادیر R^2 معمولاً بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۸ گزارش شده

سنگ‌ها، انحلال کانی‌ها و تبادل یونی قرار دارد که با نتایج مطالعات اخیر در آبخوان‌های مختلف جهان همخوانی دارد [۲۵]. بطور کلی می‌توان گفت ارزیابی به روش کریجینگ نشان می‌دهد، شاخص WQI در سطح منطقه عموماً در سطح ۱۰۰-۰ بوده و از نظر شاخص WQI مناسب برای مقاصد شرب طبقه بندی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، تغییرات مکانی شاخص WQI در منطقه مورد مطالعه، ارتباط نزدیکی با شرایط هیدروژئولوژیکی دارد. جهت جریان آب زیرزمینی نقش مهمی در انتقال املاح و شکل‌گیری الگوهای مکانی کیفیت آب ایفا می‌کند. همچنین تنوع لیتولوژی سازندهای زمین‌شناسی موجب تفاوت در میزان انحلال و آزادسازی یون‌ها در آبخوان شده است. علاوه بر این، کاربری اراضی به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی می‌تواند از طریق ورود آلاینده‌ها و کودهای شیمیایی بر افزایش یا کاهش کیفیت آب زیرزمینی اثرگذار باشد.

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که روش‌های زمین‌آماري، به‌ویژه کوکریجینگ ساده، با استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی، در مقایسه با بسیاری از مطالعات پیشین، توان بالاتری در تبیین ساختار فضایی و برآورد دقیق شاخص کیفیت آب (WQI) در مقیاس دشت دارد. مقدار بسیار کم اثر قطعه‌ای و نسبت ناچیز آن به سقف واریوگرام برای هر دو متغیر

جدول ۶. مقادیر شاخص WQI مناطق به روش کوکریجینگ برای مصارف آشامیدنی.

Table 6. WQI index values of regions using the cokriging method for drinking water uses.

محدوده شاخص	وضعیت آب	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد از کل
کمتر از ۵۰	عالی	۷۵۰	۴۴
۵۰-۱۰۰	خوب	۸۸۶	۵۲
۱۰۰-۲۰۰	ضعیف	۵۲	۳
۲۰۰-۳۰۰	بسیار ضعیف	۱۷	۱
بیشتر از ۳۰۰	نامناسب	۰	۰
مجموع		۱۷۰۵	۱۰۰

جدول ۷. شاخص‌های عملکردی مدل برای شاخص WQI.

Table 7. Model performance indicators for the WQI index.

R ²	ε %	MAE (/)	RMSE (/)	EF
۰/۸۵	۳/۶	۰/۲۱	۳/۲۷	۰/۷۱

نشان داد که تغییرات مکانی کیفیت آب دارای الگوی منسجم بوده و به شدت تحت تأثیر شرایط زمین‌شناسی و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی است. مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند که روش‌های زمین‌آماري مانند کریجینگ نسبت به روش‌های قطعی، دقت بالاتری در پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت آب دارند [۲۹]. همچنین استفاده از GIS در کنار WQI امکان شناسایی مناطق بحرانی و تحلیل فضایی دقیق‌تر را فراهم می‌سازد [۳۰]. از سوی دیگر، رویکردهای ترکیبی مبتنی بر GIS و مدل‌های پیشرفته نشان داده‌اند که می‌توانند عدم قطعیت مکانی را کاهش داده و قابلیت اعتماد نقشه‌های کیفیت آب را افزایش دهند [۳۱]. علاوه بر این، مطالعات اخیر بیان کرده‌اند که فرآیندهای طبیعی مانند انحلال کانی‌ها، تبادل یونی و تأثیر فعالیت‌های انسانی نقش کلیدی در کنترل کیفیت آب زیرزمینی دارند [۳۲]. در مجموع، نتایج این پژوهش بر اهمیت استفاده از رویکردهای تلفیقی WQI-GIS-Geostatistics برای مدیریت پایدار منابع آب تأکید دارد. این روش‌ها می‌توانند به عنوان ابزار تصمیم‌گیری در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و

است. از منظر کیفی نیز، نتایج این تحقیق نشان داد که بیش از ۹۶ درصد از سطح دشت مشکین در طبقات «عالی» و «خوب» قرار دارد، در حالی که در بسیاری از دشت‌های ایران و مناطق نیمه‌خشک جهان، سهم این طبقات کیفی به‌طور قابل‌توجهی کمتر گزارش شده است ([۱۳]، [۲۷]). این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط زمین‌شناسی، شدت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، الگوی جریان آبخوان و نیز میزان فعالیت‌های کشاورزی باشد. افزون بر این، تمرکز نواحی با کیفیت بالاتر در بخش‌های مرکزی و غربی دشت مشکین با کاهش تدریجی غلظت یون‌های محلول همخوانی دارد، در حالی که پژوهش‌های جدید مبتنی بر یادگیری ماشین نشان می‌دهند که در بسیاری از دشت‌های کشاورزی، فعالیت‌های انسانی می‌تواند به‌سرعت منجر به گسترش پهنه‌های با WQI نامطلوب شود [۲۸]. در سال‌های اخیر، ترکیب شاخص کیفیت آب (WQI) با روش‌های زمین‌آماري و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان یکی از رویکردهای مؤثر در پایش و مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. نتایج این پژوهش

برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرند.

مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه فعالیت‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد، اما تاکنون اثر آن‌ها به‌صورت گسترده موجب افت شدید کیفیت آب زیرزمینی نشده است. در مجموع، یافته‌های این پژوهش در مقایسه با مطالعات مشابه داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهد که تلفیق شاخص WQI به‌عنوان یک متغیر مکانی با روش کوکریجینگ ساده و استفاده هدفمند از هدایت الکتریکی به‌عنوان متغیر کمکی، نه تنها دقت برآورد فضایی کیفیت آب زیرزمینی را به‌طور معناداری افزایش داده، بلکه با ارائه شواهد آماری روشن از استحکام بالای ساختار فضایی شاخص WQI و کاهش عدم قطعیت تخمین، یک چارچوب روش‌شناختی نوآورانه و قابل تعمیم برای پایش، مدیریت و حفاظت از منابع آب شرب در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کند که می‌تواند مبنایی برای توسعه مطالعات آینده و ادغام با رویکردهای پیشرفته‌تر تحلیل مکانی و تصمیم‌گیری باشد. از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به استفاده از داده‌های یک دوره زمانی مشخص اشاره کرد که امکان بررسی تغییرات فصلی و سالانه کیفیت آب زیرزمینی را محدود می‌سازد. همچنین، تعداد محدود چاه‌های نمونه‌برداری (۴۲ حلقه چاه) می‌تواند بر دقت تحلیل‌های زمین‌آماري و پایداری نیم‌تغیرنا اثرگذار باشد. عدم بررسی تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی و کیفیت آن در دوره‌های خشکسالی از دیگر محدودیت‌های مهم این مطالعه است. با این وجود، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای مطالعات تکمیلی در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی طی قرار داد پژوهشی ۲۴۷۴۱ تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- [1] M. Pashaei Far, R. Dehghanzadeh, M.E. Ramazani, O. Rafieian, A. Najayi, Assessment of hydrogeochemical processes and groundwater quality using WQI, graphical methods, and multivariate statistical analyses: Case study of Shabestar plain, Journal of Water Resources Engineering, 16(56) (2023) 15–30 (in Persian).
- [2] M. Mirshkari, M. Tabatabai, R.H. Mohammadi, Assessment of spatial and temporal groundwater quality variations in Seydan-Farouq plain for agricultural,

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کیفیت آب زیرزمینی دشت مشگین با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) و به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماري در محیط GIS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص WQI ابزار مناسبی برای تلفیق پارامترهای متعدد هیدروشیمیایی و ارائه یک تصویر جامع از وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه است. بررسی آماری و فضایی داده‌ها بیانگر آن بود که شاخص WQI و متغیر هدایت الکتریکی از ساختار فضایی قوی و پیوسته‌ای برخوردارند که این امر امکان مدل‌سازی دقیق تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی را فراهم کرده است. در این راستا، استفاده از روش کوکریجینگ ساده با بهره‌گیری از هدایت الکتریکی به‌عنوان متغیر کمکی، نسبت به روش‌های تک‌متغیره، دقت بالاتری در برآورد و پهنه‌بندی شاخص WQI ارائه داد. نتایج پهنه‌بندی کیفی نشان داد که بخش عمده‌ای از

- province, Journal of Rangeland and Watershed Management, 68(4) (2015) 809–820 (in Persian).
- [12] T. Shirvani, I. Shirvani Sarouyi, M.H. Bouchani, F. Aref, Groundwater quality assessment of Sahra-ye-Bagh plain for agricultural and industrial uses, Ecohydrology, 2(4) (2015) 345–356 (in Persian).
- [13] F. Eslami, R. Shokouhi, S. Mazloumi, M. Darvish Motavali, M. Salari, Assessment of Water Quality Index (WQI) of groundwater resources in Kerman province in 2015, Journal of Occupational Health and Environment, 1(3) (2017) 45–48 (in Persian).
- [14] L. Hamidian, S.H. Meraji, E. Fijani, S. Batalblooi, Assessment of groundwater quality in Bushehr province using water quality index, Journal of Hydrogeology, 2(1) (2017) 31–44 (in Persian).
- [15] R. Bahrami Nasab, H. Pir Kharati, A. Abbasfam, Z. Sheikhi, D. Bazargan, Groundwater quality assessment of Rashkan plain for agricultural use, Proceedings of the First Conference on Fundamental Research in Agricultural and Environmental Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (2019) (in Persian).
- [16] M. Qareh Mahmoudloo, A. Zare, Groundwater quality assessment of Seydan-Farouq plain for agricultural purposes, Proceedings of the 2nd National Conference on Agricultural Science, Natural Resources, and Environment of Iran, Tehran, Iran (2018) (in Persian).
- [17] H. Banzhad, H. Mohebzadeh, Groundwater quality assessment of Razan-Qahavand plain for agricultural use using GIS, Quarterly Journal of Geographical Space Studies, 12(38) (2011) 9 (in Persian).
- [18] A.A. Hosseini Pak, Geostatistics, University of Tehran Press, Tehran, Iran (1998) (in Persian).
- [19] Y. Hoseini, Optimization of saturated hydraulic conductivity estimation using kriging in drainage networks, Applied Water Science, 13 (2023) 94. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01897-3>.
- [20] F. Dardour, et al., A novel approach for groundwater quality assessment using WQI, Journal of Hydrology, 598 (2021) 126465.
- industrial, and drinking purposes, National Conference on Water and Wastewater Engineering, Kerman, Iran (2012) (in Persian).
- [3] M. Hassanalipour, A. Esmailiouri, E. Ahmadi, Y. Imani, M. Raeuf, M.R. Abazar, Assessment of urban development impacts on quantity and quality of surface and groundwater in Ardabil plain, Environmental Science Studies, 7(3) (2022) 5374–5385 (in Persian).
- [4] Turkish Statistical Institute (TUIK), Agricultural Statistics Summary, 2018.
- [5] F. Karimi, S. Sultana, A. Shirzadi Babakan, D. Royall, Land suitability evaluation for organic agriculture of wheat using GIS and multi-criteria analysis, Applied Geography, 4(3) (2018) 326–342.
- [6] Y. Hoseini, M. Kamrani, Using a fuzzy logic decision system to optimize the land suitability evaluation for a sprinkler irrigation method, Outlook on Agriculture, 47(4) (2018) 298–307.
- [7] H.F. Obidavi, Z. Fatemeh, Spatial distribution of water quality index based on WHO standards using GIS: Case study of Firoozabad groundwater, Human and Environment Journal (2021) (in Persian).
- [8] S. Hashmati, H. Beigi Harchgani, Spatial patterns and zoning of groundwater quality indices of Shahr-e-Kord for designing drip irrigation systems, Proceedings of the 5th Environmental Engineering Conference, Tehran, Iran (2012) (in Persian).
- [9] M. Nakhaei, M. Vadiati, Application of fuzzy inference model for assessing qanat water quality for drinking and agricultural uses (Tehran province), Journal of Advanced Applied Geology, 6 (2013) (in Persian).
- [10] B. Imani, J. Jafarzadeh, Groundwater quality assessment for drinking purposes in rural areas using geostatistical analysis and GIS: Case study of Ardabil County, Quarterly Journal of Geographical Information Science, 32(127) (2023) 151–170 (in Persian).
- [11] A. Malkian, M. Mirdashtvan, Groundwater quality assessment for agricultural use using geostatistical analyses: Case study of Hashtgerd plain, Alborz

- WQI–GIS approach for groundwater quality assessment in arid and semi-arid regions, *Sustainable Water Resources Management*, 9 (2023) 67.
- [28] H. Zheng, S. Hou, J. Liu, Y. Xiong, Y. Wang, Advanced machine learning approaches for groundwater quality assessment using water quality indices, *Journal of Hydrology*, 629 (2024) 130402. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130402>.
- [29] F.A. Ababakr, K.O. Ahmed, A. Amini, H. Gökçekuş, Spatio-temporal variations of groundwater quality index using geostatistical methods and GIS, *Applied Water Science*, 13 (2023) 206. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02010-4>.
- [30] V.B. Patil, V.R. Saraf, Review of groundwater mapping and water quality assessment using GIS and Water Quality Index (WQI), *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(21s) (2024) 4612.
- [31] H.M. Shuaibu, S.M. Abdullahi, A.A. Yusuf, M.B. Bello, Hydrogeochemical processes controlling groundwater quality and sustainability in arid environments, *Water*, 16(4) (2024) 601. <https://doi.org/10.3390/w16040601>.
- [32] L. Seraiche, R. Benzaid, M. Khelifi, Groundwater vulnerability assessment in semi-arid regions using GIS-based multi-criteria and geostatistical approaches, *arXiv preprint* (2026). <https://arxiv.org/abs/2602.00023>
- [21] World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th Edition, Incorporating the 1st Addendum, Geneva, Switzerland (2017).
- [22] N. Adimalla, H. Qian, Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) and GIS techniques in semi-arid regions, *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (2021) 100–115.
- [23] M. Castellini, A.M. Stellacci, M. Tomaiuolo, E. Barca, Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in a durum wheat field: An assessment by the BEST-Procedure, *Water*, 11 (2019) 1434.
- [24] W.A. Agyare, S.J. Park, P.L.G. Vlek, Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity, *Vadose Zone Journal*, 6(2) (2007) 423–431.
- [25] M.H. Razi, W. Wilopo, D.P.E. Putra, Hydrogeochemical evolution and water–rock interaction processes in the multilayer volcanic aquifer of Yogyakarta-Sleman Groundwater Basin, Indonesia, *Environmental Earth Sciences*, 83 (2024) 164. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11477-6>.
- [26] R.S. Chauhan, S. Singh, M. Kumar, A comprehensive water quality index based on analytic hierarchy process for groundwater quality assessment, *Ecological Indicators*, 145 (2022) 109582. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109582>.
- [27] K.K. Yadav, N. Gupta, V. Kumar, J.K. Singh, Integrated

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Hoseini , *Assessment of Geostatistical Methods in Groundwater Quality Evaluation of Mashginshahr Plain Using WQI Index*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 58(3) (2026) 413-436.

DOI: [10.22060/ceej.2026.25472.8414](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.25472.8414)



